

**ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI SEBELUM DAN
SESUDAH PWHT PADA SAMBUNGAN TUBULAR TIPE K
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Dyah Setyo Nugraheni

NRP. 4312 100 079

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni, ST., M.T., Ph.D.

(Pembimbing 1)

2. Ir. Handayanu, M.sc., Ph.D.

(Pembimbing 2)

3. Ir. Joswan Joesoef Soddjono, M.Sc.

(Penguji 1)

4. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

(Penguji 2)

5. Ir. Wisnu Wardhana, SE., M.sc., Ph.D.

(Penguji 3)

SURABAYA, JULI 2016

ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI SEBELUM DAN SESUDAH PWHT PADA SAMBUNGAN TUBULAR TIPE K DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama : Dyah Setyo Nugraheni
NRP : 4312 100 079
Jurusan : Teknik Kelautan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, ST., M.T., Ph.D.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Tegangan sisa dan distorsi merupakan permasalahan utama yang terjadi pada proses pengelasan. Analisa yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menganalisis tegangan sisa dan distorsi sebelum dan sesudah PWHT dengan mengacu pada AWS D1.1 dan juga menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga. Acuan analisa distribusi tegangan sisa adalah menggunakan fasilitas *pathline* operator yang diberikan sebanyak 4 *pathline* pada bagian atas dan tengah *chord*. Dari hasil analisis didapatkan tegangan sisa terbesar adalah 297 Mpa yang terletak pada *path* 2 atau pada bagian *gap* antar *brace* sedangkan untuk nilai total deformasi adalah sebesar 0,03 m atau 3 cm yang terjadi pada ujung *brace* sebelah kanan. PWHT adalah bagian dari proses *heat treatment* yang bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah proses pengelasan selesai. Perlakuan PWHT yang diterapkan pada penelitian ini adalah dengan memvariasikan suhu *heating rate* yaitu, 528 K, 588 K, dan 648 K. Nilai tegangan sisa setelah PWHT berkurang 7 Mpa hingga 21,39 Mpa. Dari analisis diatas didapatkan bahwa perlakuan PWHT dapat mengurangi tegangan sisa yang terjadi.

Kata kunci : Distribusi temperatur, tegangan sisa, distorsi, PWHT

RESIDUAL STRESS AND DISTORTION ANALYSIS BEFORE AND AFTER PWHT ON TUBULAR K-JOINT BY FINITE ELEMENT METHOD

Name : Dyah Setyo Nugraheni
Reg.Number : 4312 100 079
Department : Ocean Engineering, FTK-ITS
Supervisor : Nur Syahroni, ST., M.T., Ph.D.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

Abstract

Residual stress and distortion are the main problems that occur in the welding process. Analysis performed in this study is to analyze the residual stress and distortion before and after PWHT by referring to AWS D1.1 and also using software based on the finite element method. The analysis of residual stress distribution is using pathline operator which is the facilities provided by 4 pathline on the top and middle of the chord. From the analysis of residual stress is 297 MPa largest located on path 2 while the total value of deformation is 0,03 m or 3 cm which occurred at the end of the brace right. PWHT is part of the process of heat treatment that aims to eliminate residual stresses that formed after the welding process is complete. Treatment PWHT were applied in this study is by varying the temperature of the heating rate is, 538 K, 588 K and 628 K. The value of residual stress after PWHT reduced by 7 Mpa until 21,39 MPa. From the above analysis it was found that the treatment PWHT may reduce residual stresses that occur.

Keyword : *Temperature distribution, residual stress, distortion, PWHT*

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| COVER | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| ABSTRAK | iv |
| ABSTRACT | v |
| KATA PENGANTAR..... | vi |
| UCAPAN TERIMA KASIH..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xi |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiv |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3 Tujuan..... | 2 |
| 1.4 Manfaat | 2 |
| 1.5 Batasan Masalah | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI | 5 |
| 2.1 Tinjauan Pustaka..... | 5 |
| 2.2 Dasar Teori | 6 |
| 2.2.1 Pengelasan..... | 6 |
| 2.2.1.1 Pengelasan FCAW | 7 |
| 2.2.2 Teori perpindahan panas | 8 |
| 2.2.2.1 Area Sebaran Panas | 8 |
| 2.2.2.2 Distribusi panas | 8 |
| 2.2.3 Konduksi dan Konveksi | 9 |
| 2.2.4 Tegangan sisa | 11 |
| 2.2.4.1 Terjadinya Tegangan Sisa | 11 |
| 2.2.4.2 Distribusi Tegangan Sisa..... | 13 |
| 2.2.4.3 Pengukuran Besar Tegangan Sisa | 14 |
| 2.2.4.4 Pengurangan dan Pembebasan Tegangan Sisa..... | 16 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.5 Terjadinya Distorsi..... | 16 |
| 2.2.6 PWHT (PWHT) | 19 |
| 2.2.7 Metode Elemen Hingga..... | 22 |
| 2.2.7.1 Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen..... | 23 |
| 2.2.7.2 Pemilihan Fungsi Displasmen | 26 |
| 2.2.7.3 Definisi Hubungan Regangan-Displasmen dan Tegangan-Regangan | 26 |
| 2.2.7.4 Penentuan Matriks Kekakuan Elemen dan Persamaan Elemen | 26 |
| 2.2.7.5 Penggabungan Persamaan Elemen dengan Penentuan Kondisi Batas..... | 27 |
| 2.2.7.6 Penyelesaian Derajat Kebebasan yang Belum Diketahui | 27 |
| 2.2.7.7 Penentuan Regangan dan Tegangan Elemen | 27 |
| 2.2.7.8 Penampilan Hasil..... | 28 |
| 3.1 Skema Diagram Alir | 29 |
| 3.2 Penjelasan Diagram Alir..... | 30 |
| 3.2.1 Studi Literatur | 30 |
| 3.2.2 Pengumpulan Data | 30 |
| 3.2.3 Pemodelan Geometris Sambungan Tubular Tipe K Menggunakan <i>Software</i> SolidWorks | 31 |
| 3.2.4 Input Hasil Geometris <i>Software</i> SolidWorks ke ANSYS 16.0 | 31 |
| 3.2.5 Analisa Thermal Menggunakan <i>Software</i> ANSYS 16.0.... | 31 |
| 3.2.6 Analisa Structural Menggunakan <i>Software</i> ANSYS 16.0 | 35 |
| 3.2.7 Perlakuan PWHT dan Variasi Temperatur | 37 |
| 3.2.8 Tegangan Sisa setelah PWHT | 38 |
| 3.2.9 Analisa dan Pembahasan..... | 38 |
| 3.2.10 Kesimpulan..... | 38 |
| 3.2.11 Penyusunan Laporan..... | 38 |
| BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN | 39 |
| 4.1 Pemodelan Struktur | 39 |
| 4.2 Analisa Geometri | 40 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.1 Perbandingan Model Geometri | 40 |
| 4.2.2 Sensitifitas Meshing | 42 |
| 4.3 Analisa Thermal..... | 43 |
| 4.3.1 Perhitungan Beban Heat Flux | 43 |
| 4.3.2 Analisa Distribusi Panas | 45 |
| 4.4 Analisa Tegangan Sisa..... | 48 |
| 4.4.1 Validasi hasil tegangan sisa | 51 |
| 4.5 Analisa Tegangan Sisa Setelah Perlakuan PWHT..... | 53 |
| 4.6 Analisa Total Deformasi..... | 57 |
| BAB V PENUTUP | 60 |
| 5.1 Kesimpulan | 60 |
| 5.2 Saran | 60 |
| DAFTAR PUSTAKA | 61 |
| LAMPIRAN | |
| BIODATA PENULIS | |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2-1. Sambungan tubular tipe K (<i>offshoremechanics.asmedigitalcollection.asme.org</i>) | 5 |
| Gambar 2-2. Proses pengelasan FCAW (Wiryosumatro, 1996) | 8 |
| Gambar 2-4. Tegangan sisa karena penahan luar pada las (Wiryosumatro, 1996) | 12 |
| Gambar 2-5. Skema distribusi tegangan sisa pada las tumpul (Wiryosumatro, 1996) | 13 |
| Gambar 2-6. Skema distribusi tegangan sisa pada las berbentuk lingkaran (Wiryosumatro, 1996) | 13 |
| Gambar 2-8. Vektor tegangan (Daryl L. Logan, 2007) | 15 |
| Gambar 2-9. Macam-macam distorsi (Putra, 2005) | 18 |
| Gambar 2-10. Grafik siklus thermal PWHT (<i>midukaritonang.wordpress.com</i>) | 19 |
| Gambar 2-11. Geometri elemen SOLID70 (<i>ansys.stuba.sk</i>) | 25 |
| Gambar 2-12. Model geometri elemen SOLID90 (<i>ansys.stuba.sk</i>) | 25 |
| Gambar 2-13. Model geometri elemen SOLID185 (<i>ansys.stuba.sk</i>) | 26 |
| Gambar 3-1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir | 29 |
| Gambar 3-2. Model geometris sambungan tubular tipe K | 31 |
| Gambar 3-3. Diagram Alir Analisa Termal | 32 |
| Gambar 3-4. Diagram Alir Analisa Struktural | 35 |
| Gambar 3-5. Aplikasi <i>Boundary Condition</i> pada ANSYS Mechanical APDL | 36 |
| Gambar 4-1. Model geometris sambungan tubular tipe K tampak depan.... | 40 |
| Gambar 4-2. Perbandingan model geometri sambungan tubular tipe K untuk (a) Percobaan 1, (b) Percobaan 2 dan (c) Percobaan 3 | 41 |
| Gambar 4-3. Grafik Sensitifitas Meshing | 42 |
| Gambar 4-4. Meshing | 43 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4-5. <i>Area chamfer</i> sambungan tubular tipe K | 44 |
| Gambar 4-6. Area Pembebanan | 45 |
| Gambar 4-7. Ilustrasi Pengelasan (kiri) Kondisi akhir pengelasan (kanan). 46 | |
| Gambar 4-8. Distribusi temperatur pada (a) <i>LoadStep</i> 1 dan (b) <i>LoadStep</i> 40 | 47 |
| Gambar 4-9. Pathline untuk pembacaan tegangan sisa (a) pada bagian atas <i>chord</i> dan (b) pada bagian tengah <i>chord</i> | 48 |
| Gambar 4-10. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas <i>chord</i> (<i>path1</i>)..... | 49 |
| Gambar 4-11. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas <i>chord</i> (<i>path 2</i>)..... | 49 |
| Gambar 4-12. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas <i>chord</i> (<i>path 3</i>)..... | 50 |
| Gambar 4-13. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas <i>chord</i> (<i>path 4</i>)..... | 51 |
| Gambar 4-14. Geometri model oleh dibuat Jang dkk (2007)..... | 52 |
| Gambar 4-15. Validasi distribusi tegangan sisa aksial pada bagian atas <i>chord</i> | 52 |
| Gambar 4-16. Grafik siklus termal proses PWHT | 54 |
| Gambar 4-17. Grafik perbandingan tegangan sisa pada (a) <i>path1</i> , (b) <i>path</i> , (c) <i>path3</i> dan (d) <i>path4</i> | 56 |
| Gambar 4-18. Total deformasi sebelum PWHT | 57 |
| Gambar 4-19. Total Deformasi setelah perlakuan PWHT pada suhu (a) 538 K, (b) 588 K, dan (c) 648 K | 58 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2-1. Minimum waktu tahan (AWS D1.1 2004) | 21 |
| Tabel 2-2. <i>Alternate Stress-Relief Heat Treatment</i> (AWS D1.1 2004)..... | 21 |
| Tabel 3-1. Spesifikasi Model Tubular Joint K..... | 30 |
| Tabel 3-2. Data WPS..... | 30 |
| Tabel 3-3. Variasi Suhu dan <i>Holding Time</i> pada pemodelan..... | 37 |
| Tabel 4-1. Ukuran Geometri Tubular Joint K..... | 39 |
| Tabel 4-2. Parameter Pengelasan | 39 |
| Tabel 4-3. Hasil perbandingan model geometri sambungan tubular tipe K | 42 |
| Tabel 4-4. Load Step Pembebanan..... | 46 |
| Tabel 4-5. Variasi suhu untuk simulasi PWHT | 53 |
| Tabel 4.6 Pengurangan tegangan sisa setelah PWHT | 56 |
| Tabel 4-7. Total deformasi | 59 |

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Langkah-langkah Pengerjaan Analisa Termal dengan *software ANSYS APDL*

Lampiran B. Langkah-langkah Pengerjaan Analisa Struktural dengan *software ANSYS APDL*

Lampiran C. *Script* pembebanan termal

Lampiran D. *Script* pembebanan structural

Lampiran E. *Welding Procedure Specification* 1112 WPS G 15

BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sambungan tipe K merupakan salah satu tipe sambungan yang banyak digunakan pada konstruksi struktur bangunan lepas pantai dan jembatan. Untuk konstruksi rangka tubular pada suatu struktur jacket, bentuk sambungan tipe K dengan *non-overlapping member tubular* sering dipilih untuk memperkecil jumlah dari sambungan. Meskipun pada tipe sambungan ini pada daerah gapnya sangat rentan terhadap beban kelelahan (Acevedo, 2012).

Penyambungan logam dengan pengelasan banyak digunakan dalam berbagai bidang manufaktur dan industri, karena sambungan las mempunyai tingkat efisiensi kekuatan sambungan yang relatif lebih baik jika dibandingkan dengan sambungan yang lainnya. Disamping itu segi operasional pengerjaan sambungan konstruksi las lebih sederhana dan relatif murah. Oleh karena itu dalam kaitannya dengan sambungan tipe K ini juga tidak lepas dari pengelasan.

Pada saat pengelasan, sumber panas berjalan terus dan menyebabkan perbedaan distribusi temperatur pada logam sehingga terjadi pemuaian dan penyusutan yang tidak merata (Putra, 2005). Panas yang tidak merata ini menyebabkan distorsi yang mengarah pada tegangan plastis dan tegangan sisa pada logam yang dilas. Tegangan sisa yang muncul di sambungan pengelasan ini dapat mempengaruhi kelelahan pada daerah pengelasan, sehingga dapat memicu timbulnya *crack* yang mengakibatkan kegagalan pada struktur. Oleh karena itu tegangan sisa dalam pengelasan harus dikurangi sampai sekecil mungkin untuk mencegah kegagalan desain suatu komponen.

Tegangan sisa dapat dikurangi dengan beberapa cara seperti; melakukan perlakuan panas, mengurangi masukan panas dan melakukan *hammering*. Metode yang lebih sering dilakukan dan dianggap efektif adalah perlakuan panas, baik *pre-heating* ataupun *post-heating*. Metode *post-heating* atau lebih sering disebut *Post Weld Heat Treatment (PWHT)*

merupakan metode yang menerapkan panas *uniform* pada daerah lasan selama waktu tahan tertentu. Dimana proses pemanasan dan pendinginan yang dilakukan pada logam bertujuan untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu yang diperlukan untuk suatu konstruksi, misalnya kekuatan (*strength*), kelunakkan (*softness*), memperhalus ukuran butir (Paradowska, 2006). Dalam penelitian ini, disimulasikan bagaimana pengaruh PWHT terhadap tegangan sisa pada hasil pengelasan sambungan tubular tipe K sebelum dan sesudah di PWHT. Sehingga dapat diketahui berapa persentase pengurangan tegangan sisa akibat ada perlakuan PWHT

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dikaji dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana distribusi panas pada hasil pengelasan sambungan tubular tipe K?
2. Bagaimana tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan tubular tipe K setelah pengelasan (*as-welded condition*)?
3. Berapa tegangan sisa dan distorsi yang terjadi setelah sambungan tubular tipe K diberi perlakuan PWHT?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian tugas akhir adalah:

1. Mendapatkan distribusi panas pada hasil pengelasan sambungan tubular tipe K.
2. Mendapatkan tegangan sisa dan distorsi yang pada pengelasan sambungan tubular tipe K pada kondisi *as-welded*.
3. Mendapatkan tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan tubular tipe K setelah diberi perlakuan PWHT.

1.4 Manfaat

Diharapkan dengan dilakukannya analisa pada sambungan tubular tipe K ini, dapat diketahui bagaimana distribusi panas pada pengelasan dan distorsi yang terjadi, sehingga dapat diketahui besar tegangan sisa yang ada sebelum dan sesudah diberi perlakuan PWHT.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Jenis sambungan adalah sambungan tubular tipe K.
2. Spesifikasi material yang digunakan adalah API 5L Grade B.
3. Prosedur pengelasan berdasarkan WPS (*Welding Procedure Specification*) dari PT. Gunanusa Utama Fabricators.
4. Jenis pengelasan yang digunakan adalah FCAW.
5. Kode dan standart yang digunakan mengacu *American Welding Society – Structural Welding Code Steel* AWS D.1.1.
6. Logam pengisi atau elektroda pada pengelasan tidak dimodelkan.
7. Pengaruh aliran panas secara radiatif diabaikan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

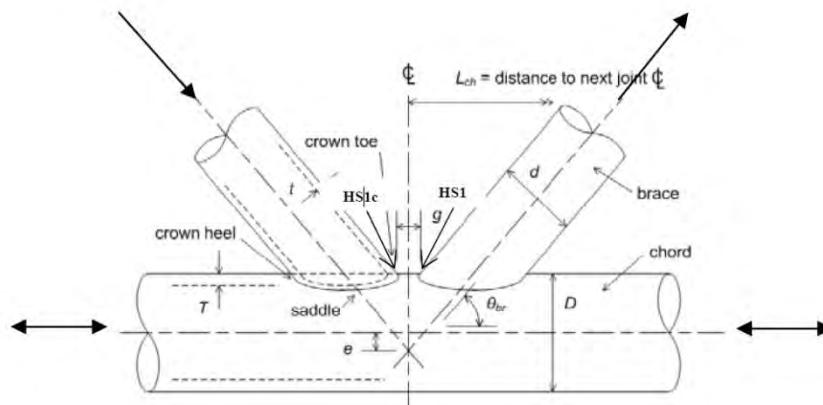
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Bentuk dari sambungan tubular sangat bermacam-macam diantaranya berbentuk T, Y, K dan X. Dari berbagai tipe sambungan tubular tersebut adanya tegangan sisa dan distorsi sebagai hasil dari pengelasan masih menjadi permasalahan. Beberapa studi telah dilakukan untuk menganalisa besar tegangan sisa yang terjadi pada sambungan tubular baik secara ekperimental maupun pemodelan numeris. Penelitian oleh C. Avezcedo, J.M. Drezet dan A.Nussbauer (2012) dalam *10th International Conference on Math: Modelling of Weld Phenomena* mensimulasikan perpindahan panas akibat pengelasan dengan memodelkan 3D *thermo-mechanical* dari sambungan tubular tipe K. Gambar sambungan tubular tipe K dapat dilustrasikan pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1. Sambungan tubular tipe K
(offshoremechanics.asmedigitalcollection.asme.org)

Tegangan sisa pada sambungan las tersebut dapat dikurangi dengan cara perlakuan panas atau pelepasan tegangan secara mekanik. Bentuk dari perlakuan panas itu sendiri seperti; *pre-heating* dan PWHT. Meski demikian, PWHT tidak selalu memiliki dampak positif dan dapat menyebabkan distorsi dan degradasi pada mikrostruktur. Pada penelitian yang dilakukan oleh A. Paradowka, J.W.H. Price, dkk (2006) membuktikan

bahwa PWHT mampu menurunkan tegangan sisa dan juga kekerasan pada daerah sambungan las.

Beberapa studi juga dilakukan untuk menganalisa tegangan sisa dan pengaruh perlakuan panas terhadap pelepasan tegangan yang terjadi pada sambungan pada suatu pelat seperti yang dilakukan oleh Sri Yuni S. (2012), Putra (2005), I Komang Ardo (2013), dan lainnya. Salah satu yang menjadi perhatian dalam penelitian yang diatas adalah bagaimana distribusi panas saat terjadi pengelasan dan berapa besar tegangan sisa dan distorsi untuk variasi pengelasan, bentuk sambungan dan karakteristik dari material juga bagaimana pengaruh perlakuan panas terhadap tegangan sisa dan distorsi.

Selain perhitungan tegangan sisa dan distorsi, beberapa penelitian mengenai pengurangan tegangan sisa dengan cara *post-heat* juga dilakukan. Penelitian telah dilakukan Telmo Viana Rodrigues (2010) mengenai perbandingan tegangan sisa sebelum dan setelah dilakukan PWHT pada pelat X65 spesifikasi material API 5L dengan variasi temperatur PWHT. Dalam tugas akhir ini akan dilanjutkan analisa tegangan sisa pada sambungan tubular khususnya tipe K dengan metode pemodelan numeris menggunakan *software ANSYS 16.0* untuk selanjutnya dikembangkan dengan membandingkan besar tegangan sisa sebelum dan sesudah diberi perlakuan panas dalam hal ini PWHT dengan memvariasikan besar suhu dan waktu tahan.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pengelasan

Pengelasan adalah penyambungan dua buah logam padat dengan mencairkannya melalui pemanasan. Persyaratan berhasilnya penyambungan adalah (Okumura, 1996):

1. Bahwa benda padat tersebut dapat cair saat dipanaskan
2. Bahwa antara benda padat tersebut ada kesesuaian sifat lasnya sehingga tidak melemahkan kekuatan sambungan.
3. Bahwa cara sambungan harus sesuai dengan sifat benda yang disambung.

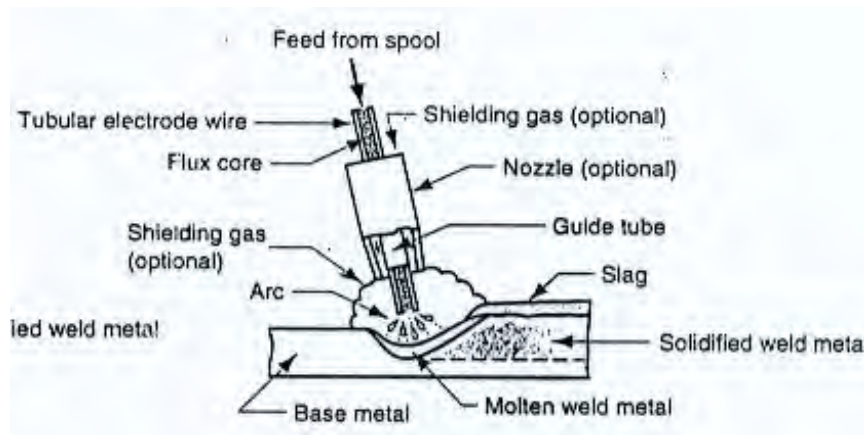
Pengelasan dilakukan untuk menyambung dua bagian logam menjadi satu, tanpa mengurangi kekuatan dan bentuk dari material logam tersebut. Selain itu, pengelasan sangat efisien dan cukup ekonomis, karena cara penyambungannya dengan cara tetap, artinya tidak mudah untuk melepas atau membongkar kembali. Dalam praktek, proses pengelasan sangat banyak jenisnya demikian juga dengan sambungan yang akan dilas, jenis kampuh manik las (*weldment*) dan posisi pengelasan yang akan dilakukan.

Urutan pengelasan yang digunakan dalam pengelasan sambungan tubular tipe K ini menggunakan metode urutan pengelasan maju/terus secara melingkar. Metode ini merupakan metode yang paling efisiensi dan mudah dikerjakan serta dilakukan secara luas dan umum. Dalam pelaksanaannya pengelasan ini dimulai dari satu ujung hingga keujung lainnya dan biasanya digunakan pada las alur tunggal, urutan ini memberikan efisiensi pengerjaan yang tinggi tetapi dapat menyebabkan terjadinya tegangan sisa yang tidak simetri.

2.2.1.1 Pengelasan FCAW

Proses pengelasan *Fluks Cored Arc Welding* (FCAW), yaitu salah satu jenis pengelasan dengan menggunakan elektroda solid dan tubular yang diumpankan secara kontinyu dari sebuah gulungan. Las FCAW adalah kombinasi antara proses pengelasan GMAW, SMAW dan SAW. Dalam pengelasan FCAW ini sumber energi menggunakan arus listrik DC atau AC yang diambil dari pembangkit listrik atau melalui *trafo* dan atau *rectifier*. FCAW menggunakan elektroda dimana terdapat serbuk *flux* di dalam batangnya. Butiran-butiran dalam inti kawat ini menghasilkan sebagian atau semua *shielding gas* yang diperlukan. Mutu hasil las FCAW bergantung pada jenis elektroda yang digunakan, metode pengelasan yang digunakan, kondisi bahan bakar dan desain sambungan las. Las Busur CO₂ biasa disebut FCAW Menurut Harsono Wiryosumarto (1996: 23-25), pengelasan ini termasuk dalam las MIG, akan tetapi bukan gas mulia yang digunakan, melainkan gas CO₂ atau campuran dari gas-gas dimana CO₂ sebagai komponen utamanya. Karena gas CO₂ adalah oksidator, maka cara ini

kebanyakan digunakan untuk mengelas konstruksi baja. Proses pengelasan FCAW dapat dilustrasikan pada Gambar 2-2.



Gambar 2-2. Proses pengelasan FCAW (Wiryosumatro, 1996)

2.2.2 Teori perpindahan panas

2.2.2.1 Area Sebaran Panas

Panas yang terjadi akan mengalami perpindahan secara konduksi, untuk melakukan analisa terhadap hal tersebut maka yang perlu diperhatikan adalah menentukan daerah temperatur media/material yang dihasilkan dari kondisi batas tertentu. Oleh karena itu, perlu diketahui distribusi temperatur yang menunjukkan bagaimana variasi temperatur sesuai fungsi posisi pada suatu medium. Konduksi flux pada titik tertentu atau permukaan suatu medium dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Fourier, apabila distribusi temperaturnya sudah diketahui. Distribusi temperatur pada benda pejal dapat digunakan untuk menganalisa besarnya *thermal stress*, ekspansi dan defleksi struktur.

Pada proses pengelasan dihasilkan siklus panas yang sangat rumit pada lasan. Siklus panas ini menyebabkan perubahan struktur mikro material pada daerah sekitar lasan (*heat-affected zone*) dan *transient thermal stress*, hingga akhirnya tercipta tegangan sisa (*residual stress*) dan perubahan bentuk (distorsi). Sebelum menganalisa permasalahan ini, harus dilakukan analisa pada aliran panas (*heat flow*) selama proses pengelasan.

2.2.2.2 Distribusi panas

Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak merata pada seluruh bagian material. Ketidakmerataan distribusi temperatur inilah yang menjadi penyebab timbulnya deformasi pada stuktur las. Sumber panas pada proses pengelasan berasal dari panas elektrode yang ada. Dimana panas ini secara matematis dapat dihitung dengan persamaan empiris (AWS D1.1, 2004):

$$H_{\text{net}} = \frac{f_1 EI}{v} \quad (2.1)$$

Dimana:

H_{net} : Energi input bersih (J/mm)

E : Tegangan (Volt)

I : Arus (Ampere)

f_1 : Efisiensi pemindahan panas

v : Kecepatan pengelasan (mm/s)

Tidak semua energi panas yang terbentuk dari perubahan energi listrik diserap 100% oleh logam lasan, hanya sebagian besar saja, sehingga energi busur las dapat ditulis sebagai berikut (Pilipenko, 2001) :

$$Q = \eta U I \quad (2.2)$$

Dimana:

Q : Net heat input (Watt)

η : Koefisien efisiensi

U : Tegangan busur (Volt)

I : Arus listrik (Ampere)

Harga koefisien efisiensi untuk tiap-tiap tipe pengelasan tentunya berbeda-beda. Sebagai contoh harga η untuk pengelasan baja dengan cara FCAW adalah antara 0,75 sampai dengan 0,93 (Pilipenko, 2001).

2.2.3 Konduksi dan Konveksi

Proses perpindahan atau distribusi panas yang terjadi saat pengelasan adalah proses konduksi dan konveksi. Proses konduksi terjadi pada logam yang menerima panas secara langsung karena adanya sentuhan langsung logam dengan elektroda. Sedangkan proses konveksi terjadi karena permukaan yang terkena langsung dengan udara. Proses konduksi lebih

dominan daripada konveksi karena memiliki nilai yang lebih tinggi dan panasnya ditransferkan ke semua arah. Persamaan dasar konduksi panas adalah (Daryl L. Logan, 2007):

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q_G + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2.3)$$

Dimana:

ρ : massa jenis (Kg/m³)

c : *specific heat* (J/Kg.k)

λ : konduktivitas termal (W/m.K)

Q_G : debit perubahan temperatur (W/m³)

Heat *flux* selama proses pemanasan dapat dihitung menggunakan hubungan vektor *heat flux* dan *thermal gradient*.

$$\{q\} = -[D] \cdot \{L\} \cdot T \quad (2.4)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Dimana:

$[D]$: Matriks konduktivitas (-)

K_{xx} : Konduktivitas arah x (W/mm.K)

K_{yy} : Konduktivitas arah y (W/mm.K)

K_{zz} : Konduktivitas arah z (W/mm.K)

Transfer panas pada distribusi temperatur dipengaruhi besarnya *heat flux* yang mengenai elemen, dapat dihitung dengan persamaan (Mahrlein, 1999):

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (2.5)$$

Dimana:

q_1 : *heat flux* pada elemen (J/mm²)

q_e : *heat flux* yang dihasilkan elektroda (J/mm²)

A_1 : luas permukaan elemen (mm²)

A_f : luasan fluks yang dihasilkan elektroda (mm²)

$$q_e = \frac{H_{net}}{A_e} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{A_e} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{\pi r_e^2} \quad (2.6)$$

Jika persamaan 2.6 disederhanakan, maka didapat:

$$A_f = b \cdot v \cdot t \quad (2.7)$$

Dimana:

b : Panjang kaki las (mm)

v : Kecepatan pengelasan (mm/s)

t : Waktu yang diperlukan pada satu elemen (s)

Konveksi adalah aliran panas dengan media perantara fluida. Sebagaimana pada konduksi, perbedaan suhu pada solid *base metal* dengan fluida pada *weld metal* menyebabkan terjadinya transfer energi dari daerah dengan suhu tinggi ke daerah dengan suhu rendah. Persamaan heat transfer secara konveksi diperoleh dari persamaan hukum pendinginan Newton,

$$q_h = h (T - T_{\infty}) \quad (2.8)$$

Dimana,

q_h = aliran panas secara konveksi (kW/m^2)

h = koefisien konveksi ($kW/m^{\circ}C$)

T = Temperatur pada permukaan solid ($^{\circ}C$)

T_{∞} = Temperatur fluida pengelasan ($^{\circ}C$)

2.2.4 Tegangan sisa

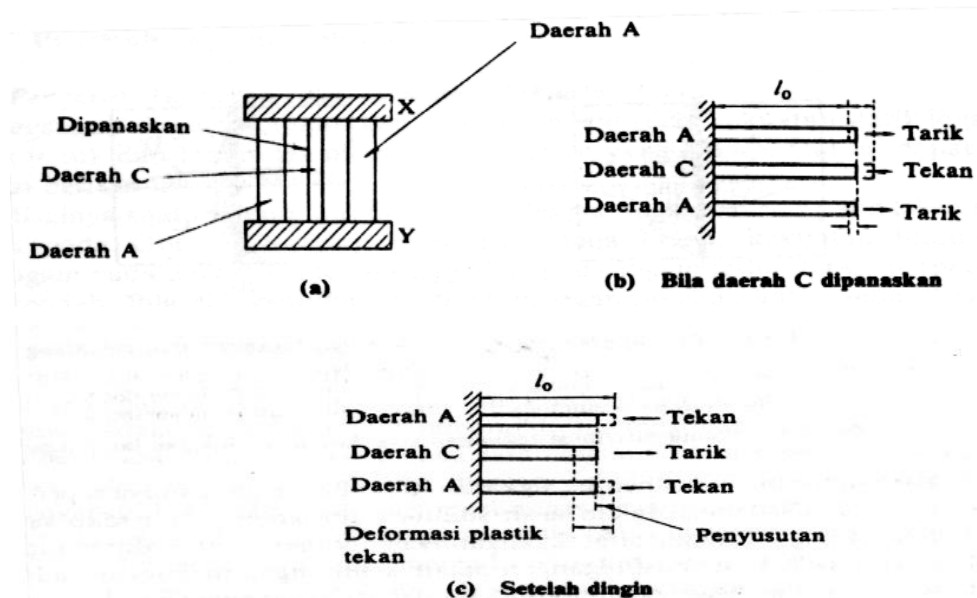
Tegangan sisa adalah gaya elastis yang dapat mengubah jarak antar atom dalam bahan tanpa adanya beban dari luar. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam dalam suatu bahan, antara lain akibat perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan pada bahan yang mengalami proses pengelasan (Wiryosumarto, 1996). Walaupun tegangan sisa secara visual tidak nampak namun sesungguhnya tegangan sisa tersebut juga bertindak sebagai beban yang tetap yang akan menambah nilai beban kerja yang diberikan dari luar.

2.2.4.1 Terjadinya Tegangan Sisa

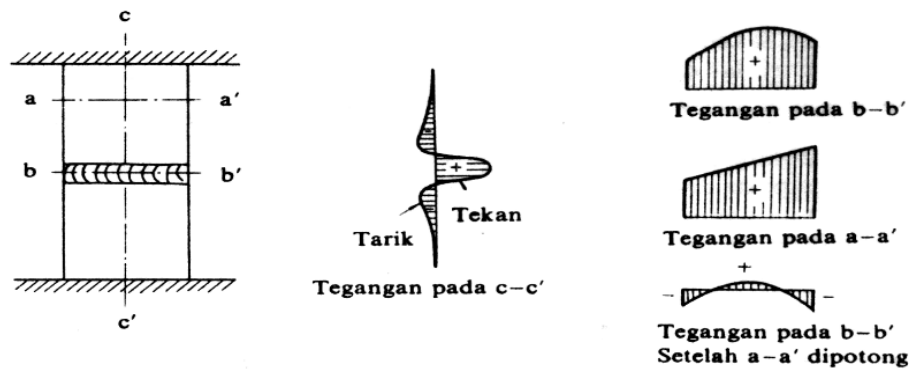
Tegangan sisa yang disebabkan oleh pengelasan memiliki tiga asal utama (J. Lu dan Lieurade, 1991); Pertama, gradien suhu dan pendinginan non-seragam di daerah pengelasan menginduksikan distorsi plastik dan tekanan sisa. Tekanan ini disebut tegangan sisa termal. Kedua, efek mekanis seperti tarikan, tekanan, misfit, dll berpartisipasi dalam penciptaan tegangan sisa. Efek ini juga terkait dengan penurunan sifat mekanik, seperti modulus Young dan tegangan luluh, pada suhu tinggi. Ketiga, transformasi fasa padat

yang menyiratkan transformasi lokal mikro ke bentuk lain tergantung dari siklus thermal pengelasan yang mengakibatkan penambahan tegangan sisa, yang disebut transformasi tegangan sisa. Fenomena ini terutama karena perubahan volumetrik dan transformasi plastisitas.

Terjadinya tegangan sisa diekspresikan pada Gambar 2-3 dibawah ini, dimana daerah C mengembang pada waktu pengelasan. Pengembangan pada daerah C ditahan oleh daerah A, sehingga pada daerah C terjadi tegangan tekan dan pada daerah A terjadi tegangan Tarik. Tetapi bila daerah A luasnya jauh lebih besar dari C, maka daerah C akan terjadi perubahan bentuk tetap, sedangkan pada daerah A terjadi perubahan bentuk elastis. Ketika proses pengelasan selesai, terjadi proses pendinginan dimana daerah C menyusut cukup besar karena disamping pendinginan juga terdapat tegangan tekan. Penyusutan ini ditahan oleh daerah A, oleh sebab itu daerah C akan terjadi tegangan tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan oleh daerah A (Wiryosumatro dan Okumura, 1996). Tegangan sisa karena penahanan luar pada las diilustrasikan pada Gambar 2-4.



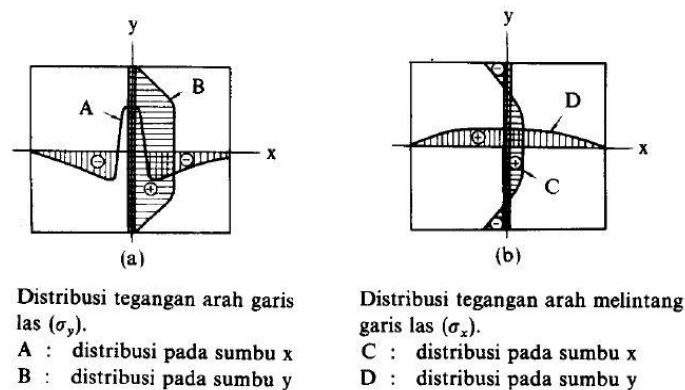
Gambar 2-3. Pembentukan tegangan sisa (Wiryosumatro, 1996)



Gambar 2-4. Tegangan sisa karena penahan luar pada las (Wiryosumatro, 1996)

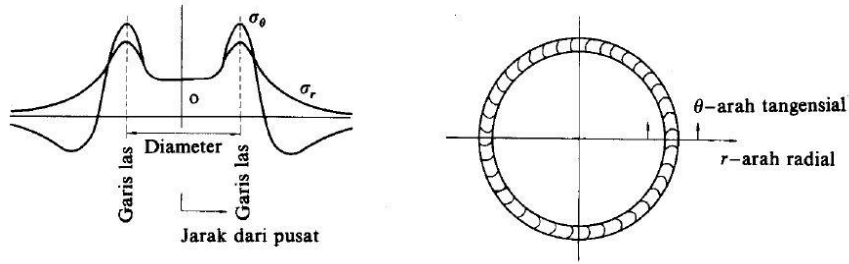
2.2.4.2 Distribusi Tegangan Sisa

Distribusi tegangan sisa tergantung dari jenis dan bentuk lasan. Dalam hal las tumpul pada garis lasan dengan arah memanjang akan mencapai batas kekuatan luluh pada garis lasan dan kemudian menurun mencapai nol pada ujung material. Sedangkan pada arah melintang garis las terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tekan seperti yang ditunjukkan Gambar 2-5 berikut.



Gambar 2-5. Skema distribusi tegangan sisa pada las tumpul (Wiryosumatro, 1996)

Dalam sambungan las bentuk lingkaran, distribusi dalam arah sudut selalu simetris terhadap satu garis yang melalui pusat lingkaran dan sifat tegangannya baik pada arah sudut maupun radial selalu tarik. Distribusi tegangan bentuk lingkaran dalam sambungan tubular hampir sama dengan dengan lasan pada plat datar. Gambar 2-6 berikut merupakan skema distribusi tegangan sisa pada las berbentuk lingkaran.



Gambar 2-6. Skema distribusi tegangan sisa pada las berbentuk lingkaran (Wiryosumatro, 1996)

2.2.4.3 Pengukuran Besar Tegangan Sisa

Tegangan sisa dapat dihitung melalui besarnya regangan sisa yang terjadi dengan menggunakan hukum Hooke. Sedangkan besarnya tegangan sisa dapat diukur dari perubahan ukuran antara batang sebelum dipotong, yaitu ukuran yang digambarkan pada bagian yang akan ditentukan tegangan sisanya dan ukuran sebenarnya yang didapat setelah bagian yang akan diuji dipotong. Dari hukum Hooke jelas bahwa perubahan ukuran ini disebabkan oleh adanya tegangan, karena itu besarnya tegangan dapat dihitung. Dalam hal tegangan satu arah dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (2.9)$$

Dimana,

$$\{\sigma\} = \text{vektor tegangan} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$$

$$[D] = \text{matrik kekakuan elastis atau matrik stress-strain}$$

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon - \varepsilon^{th}\} = \text{vektor regangan elastis}$$

$$\{\varepsilon\} = \text{vektor regangan total} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz}]^T$$

$$\{\varepsilon^{th}\} = \text{vektor regangan termal}$$

Persamaan (2.9) dapat dijabarkan menjadi,:

$$\{\varepsilon^{th}\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1}\{\sigma\} \quad (2.10)$$

Untuk kasus tegangan sisa pada model 3-dimensi, maka pada persamaan regangan termal dapat diubah menjadi,

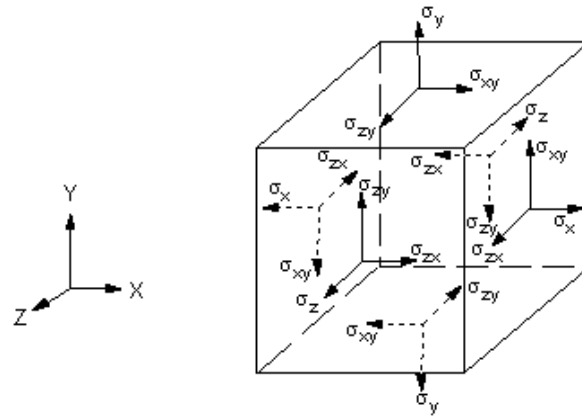
$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2.11)$$

dimana:

α_x = koefisien ekspansi termal arah sumbu-x

ΔT = perbedaan temperatur yang ditinjau dengan temperatur referensi

Vektor tegangan yang bekerja pada struktur dapat diilustrasikan pada Gambar 2-8 berikut



Gambar 2-8. Vektor tegangan (Daryl L. Logan, 2007)

Matrik kekakuan $[D]^{-1}$ adalah sebagai berikut

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -v_{xy}/E_x & -v_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -v_{yx}/E_y & 1/E_y & -v_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -v_{zx}/E_z & -v_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dimana,

E_x = modulus elastisitas arah x

v_{xy} = mayor *poisson ratio*

v_{yx} = minor *poisson ratio*

G_{xy} = modulus geser bidang x-y

Untuk material isotropik maka $E_x = E_y = E_z$ dan $v_{xy} = v_{yz} = v_{xz}$

Tegangan sisa dapat diukur dengan cara numerikal dan eksperimental. Untuk cara eksperimental dapat dilakukan dengan teknik

pengukuran destruktif dan non-destruktif. Beberapa metode pengukuran tegangan sisa dengan teknik destruktif yaitu:

1. Metode *Hole-drilling*
2. Metode *Ring-core*
3. Metode *Bending deflection*
4. Metode *Sectioning*

Sedangkan untuk teknik non-destruktif dilakukan tanpa merusak sample. Cara ini dinilai lebih akurat karena menggunakan bantuan teknologi terkini. Beberapa metode umum yang digunakan untuk metode pengukuran non-destruktif, yaitu:

1. *X-ray/ neutron/ diffraction*
2. *Ultrasonic*
3. *Magnetic methods*

Besarnya tegangan sisa dapat dikurangi dengan cara mengurangi masukan panas dan banyaknya logam lasan. Penghalang luar juga menyebabkan terjadinya tegangan sisa, maka perlu menentukan urutan pengelasan (*welding sequence*) yang tepat.

2.2.4.4 Pengurangan dan Pembebasan Tegangan Sisa

Dalam pengelasan tegangan sisa terjadi karena penyusutan pada waktu pendinginan setelah pengelasan. Besarnya tegangan sisa dapat dikurangi dengan jalan mengurangi masukan panas dan banyaknya logam lasan yang dilaksanakan dengan memperkecil sudut alur dari kampuh dan memperkecil celah akar pada las tumpul. Karena penghalang luar juga menyebabkan terjadinya tegangan sisa, maka perlu dihindari terjadinya dengan menentukan urutan pengelasan (*welding sequence*) yang baik.

Terdapat dua cara pembebasan tegangan sisa, yaitu cara mekanik dan cara termal. Dari kedua cara ini yang paling banyak dilakukan adalah cara termal dalam proses anil. Proses *annealing* adalah proses pemanasan kembali material yang telah dilas sampai pada waktu tertentu, aktivitas dari proses ini yang disebut PWHT.

2.2.5 Terjadinya Distorsi

Pada proses pengelasan, tegangan sisa dan distorsi merupakan kejadian yang saling berhubungan. Ketika siklus pemanasan dan pendinginan yang berlangsung dalam proses pengelasan, regangan panas muncul di antara weld metal dan base metal pada daerah yang dekat dengan *weld bead*. Peregangannya ini menimbulkan suatu tegangan dalam yang terdapat di dalam material dan bisa menyebabkan terjadinya bending, buckling, dan rotasi. Deformasi inilah yang disebut distorsi. Distorsi terjadi jika logam las dibiarkan bergerak leluasa selama proses pendinginan. Jadi distorsi terjadi karena adanya pemuaian dan penyusutan yang bebas akibat siklus termal las.

Distorsi akan menyebabkan:

- a. Bentuk akhir tidak memenuhi syarat baik keindahan maupun letak
- b. Terjadi misalignment
- c. Dapat menjadi bagian terlemah
- d. Mengganggu distribusi gaya

Macam-macam distorsi yang terjadi pada pengelasan:

a. *Transverse shrinkage*

Penyusutan yang terjadi tegak lurus terhadap arah garis las

b. *Angular change/ Angular shrinkage*

Distribusi panas yang tidak merata pada kedalaman menyebabkan distorsi (perubahan sudut)

c. *Rotational distortion*

Distorsi sudut dalam bidang plat yang berkaitan dengan perluasan thermal

d. *Longitudinal shrinkage*

Penyusutan yang terjadi searah garis las

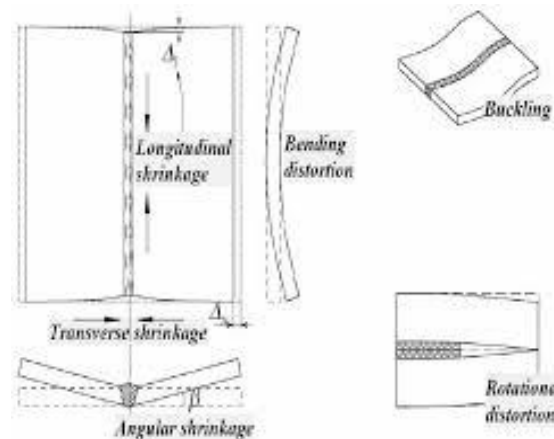
e. *Longitudinal bending distortion*

Distorsi dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap plat

f. Buckling distortion

Merupakan fenomena yang berkaitan dengan kompresi yang berkenaan dengan panas menyebabkan ketidakstabilan ketika platnya tipis

Macam-macam distorsi yang terjadi pada pengelasan dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2-9 berikut ini;



Gambar 2-9. Macam-macam distorsi (Putra, 2005)

Terdapat tiga pendekatan untuk menyelesaikan masalah distorsi:

1. Pengembangan proses pengelasan dan prosedur fabrikasi untuk meminimalisasi terjadinya distorsi.
2. Pembuatan standar perbandingan mengenai toleransi minimal distorsi pengelasan.
3. Pengembangan teknik untuk menghilangkan distorsi setelah distorsi tersebut muncul.

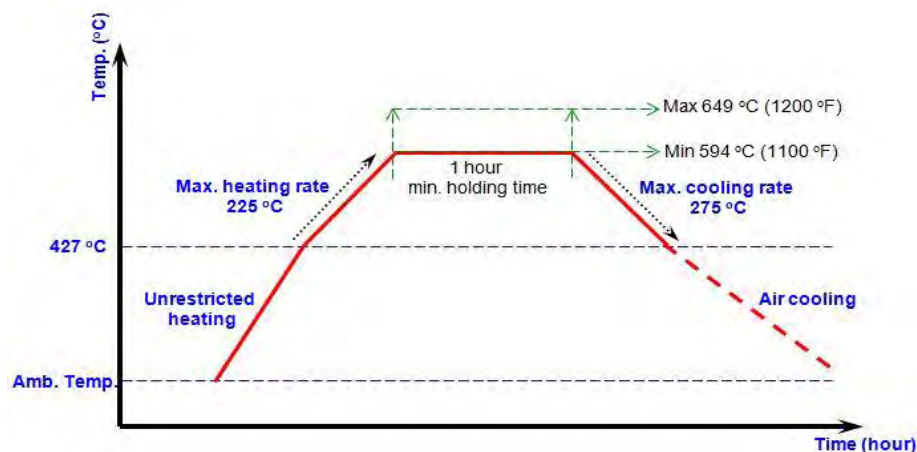
Cara-cara yang dapat ditempuh untuk meminimalisir terjadinya distorsi diatas adalah lebih mudah daripada harus menghilangkan distorsi setelah pengelasan selesai dilakukan. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam pengelasan agar distorsi dapat dihindari antara lain:

- Jumlah welding pass, semakin banyak jumlah dari weld pass yang digunakan akan meningkatkan resiko terjadinya distorsi
- *Welding sequence* atau urutan pengelasan, yaitu melakukan proses pengelasan dengan urutan tertentu untuk meminimalkan masukan panas pada material.

- Derajat pengekan (*level of restraint*), menentukan seberapa besar tahanan untuk mempertahankan material tetap pada posisinya. Penggunaan penahan/tanggem akan meminimalkan pergerakan/pergeseran material saat proses pengelasan.
- Detail sambungan, bentuk geometri sambungan lasan dan jenis sambungan mempengaruhi bentuk distorsi yang terjadi. Semakin merata distribusi deposit logam las pada kampuh las akan semakin mengurangi timbulnya distorsi, khususnya angular distortion.

2.2.6 PWHT (PWHT)

PWHT merupakan proses perlakuan panas pada benda hasil pengelasan dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah proses pengelasan selesai. Setelah pemanasan dan pendinginan akibat proses pengelasan, sifat material akan berubah karena adanya perubahan struktur mikro. Untuk mengembalikan kembali sifat material struktur misalnya kekuatan (*strength*), kelunakkan (*softness*), memperhalus ukuran butir, maka dilakukan pemanasan pada suhu tertentu dan pada jangka waktu tertentu. Parameter suhu dan waktu ini tergantung pada jenis material dan ketebalan material. Hasil pengukuran PWHT biasanya dalam suatu grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-10.



Gambar 2-10. Grafik siklus thermal PWHT (midukaritonang.wordpress.com)

Dalam AWS D1.1 paragraph 3.14 mengenai *Postweld Heat Treatment* dijelaskan bahwa PWHT dapat dilakukan dengan persyaratan sebagai berikut:

1. Material yang di PWHT memiliki nilai *specified minimum yield strength* tidak melebihi 50 Ksi (345 MPa)
2. Material yang di PWHT bukan material hasil *quenching & tempering, quenching & self-tempering, thermomechanical control processing* (contohnya seperti ASTM A 500 tubing)
3. Material yang akan di PWHT tidak mensyaratkan *impact test* pada *base metal*, HAZ atau *weld metal*.
4. Adanya data pendukung bahwa material yang di PWHT memiliki kekuatan dan keuletan yang cukup.
5. PWHT harus diproses sesuai dengan section 5.8

Dalam AWS D1.1 section 5.8 dijelaskan untuk perlakuan *stress-relief* harus sesuai dengan persyaratan antara lain:

1. Suhu dari tungku pembakaran tidak boleh melampaui 600°F (315°C) pada saat akan meletakkan benda hasil pengelasan yang akan ditinjau.
2. Diatas 600°F, laju pemanasan tidak boleh lebih dari 400°F perjam dibagi dengan tebal logam maksimum dari bagian tertebalnya, dalam satuan inchi. Diatas 315°C, laju pemanasan dalam °C/hr tidak boleh melebihi 5600 jika dibagi dengan tebal logam maksimumnya, tetapi hasil pembagian juga tidak boleh lebih dari 220°C/hr. Selama periode pemanasan, variasi suhu dari bagian yang sedang dipanaskan tidak boleh lebih dari 250°F (140°C) tiap 15ft (5m) panjang interval. Laju pemanasan dan pendinginan tidak boleh kurang dari 100°F (55°C) perjam. Akan tetapi dalam beberapa kasus untuk ruang tertutup dan struktur khusus mungkin menunjukkan laju penurunan pemanasan dan pendinginan untuk menghindari kegagalan struktur.

3. Setelah mencapai suhu maksimum 1100°F (600°C) pada *quenched* dan *tempered steel*, atau suhu rata-rata antara 1100°F (600°C) dan 1200°F (650°C) yang dicapai pada baja lain, suhu pada alat yang terpasang harus ditahan pada batas waktu spesifik seperti pada Tabel 2-1. Ketika *specified stress-relief* pada kondisi stabil, waktu tahan tidak boleh kurang dari yang ditunjukkan pada Tabel 2-1 berdasarkan ketebalan perbagiannya. Selama periode *holding time* tidak boleh ada perbedaan suhu tertinggi dan terendahnya sampai 150°F (85°C).
4. Diatas 600°F (315°C), pendinginan harus telah selesai pada konduktor pemanas atau ruangan pendingin dengan laju pendinginan tidak lebih besar dari 500°F (260°C) perjam dibagi dengan ketebalan logam maksimumnya pada bagian tertebalnya dalam satuan inchi, tetapi tidak memungkiri jika lebih dari 500°F (260°C) perjamnya. Dari 600°F (315°C) perakitan dapat didinginkan diudara normal.

Tabel 2-1. Minimum waktu tahan (AWS D1.1 2004)

| <i>Weld thickness</i> | <i>Holding time</i> |
|-----------------------|--|
| ¼ in atau kurang | 15 menit |
| ¼ in – 2 in | 1 jam/ in (5 menit/2 mm) |
| Lebih dari 2 in | 2 jam plus 15 menit untuk tiap pertambahan inch (25 mm). |

Ketika PWHT tidak dapat dilakukan dengan batasan temperatur sesuai dengan kriteria di atas, maka dapat dilakukan PWHT alternatif. Dalam PWHT alternatif, pembebasan tegangan dilakukan pada temperatur yang lebih rendah tetapi dengan waktu tahan yang lebih lama. Temperatur dan waktu tahan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2-2.

Tabel 2-2. *Alternate Stress-Relief Heat Treatment* (AWS D1.1 2004)

| Penurunan Temperatur di Bawah Ketentuan Temperatur Minimum | | Waktu Tahan Minimum Saat Penurunan Temperatur, Jam/Inch ketebalan |
|---|--------------------------|---|
| $\Delta^{\circ}\text{F}$ | $\Delta^{\circ}\text{C}$ | |
| 50 | 30 | 2 |
| 100 | 60 | 4 |
| 150 | 90 | 10 |
| 200 | 120 | 20 |

Proses PWHT dapat dilakukan dengan dua cara yaitu memasukkan benda uji kedalam dapur atau melakukan pemanasan setempat *localized* didekat daerah pengelasan saja. Metode mana yang akan dilakukan lebih bersifat kepada pertimbangan ekonomis saja. Parameter parameter dalam PWHT yang perlu dijaga adalah:

1. *Heating rate*, merupakan proses pemanasan sampai temperatur diatas atau dibawah temperatur kritis suatu material.
2. *Holding temperatur*, menahan material pada temperatur pemanasan untuk memberikan kesempatan adanya perubahan struktur mikro.
3. *Cooling Rate*, mendinginkan dengan kecepatan tertentu tergantung pada sifat akhir material yang diinginkan.

Dalam melakukan PWHT banyak hal yang harus diperhatikan agar tujuan dari PWHT ini dapat tercapai, antara lain:

1. *Expansion area*, dikarenakan proses panas mengakibatkan terjadinya pemuaihan dan ekspansi material maka harus diperhatikan bahwa saat *stress relieve* material tersebut tidak mengalami *restraint*.
2. *Insulasi*, saat element sudah terpasang dengan benar maka area disekitar (*adjacent*) element harus ditutup dengan *glasswool* dan fiber keramik untuk menjaga kestabilan suhu.
3. *Cleaning Material*, material harus bersih dari segala kotoran, minyak dan air.

4. *Support material*, proses pemanasan akan mengakibatkan terjadinya pelunakan material. Dengan adanya gaya gravitasi maka material yang akan di PWHT harus diberikan *support* sehingga tidak terjadi distorsi.

2.2.7 Metode Elemen Hingga

Konsep dasar metode elemen hingga adalah pendekatan menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam proses penentuan titik simpul yang di sebut dengan pendeskritan (*discretization*), suatu sistem di bagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh. Usaha pendiskritan ini dilakukan agar memudahkan dalam analisa karena adanya keterbatasan dalam analisa secara global. Keunggulan dari metode elemen hingga adalah jaringan elemen– elemen yang terbentuk sangat dekat dengan struktur aktual yang akan dikaji. Disamping keunggulan metode elemen hingga juga memiliki kelemahan yaitu hasil dari analisa yang ada berupa numerik bukan suatu persamaan bentuk tertutup yang dapat dipakai dalam memecahkan berbagai kasus (Saeed, 2003).

Elemen dalam ANSYS bisa dikategorikan kedalam 2D atau 3D dan terdiri dari elemen titik, Elemen garis, elemen area dan elemen solid. Elemen-elemen ini dapat dikombinasikan sesuai dengan yang dibutuhkan. LINE element bisa digunakan sebagai 2D atau 3D. 2D SOLID analisis digunakan untuk struktur datar yang tipis (*plane stress*), struktur yang memiliki penampang melintang konstan (*plane strain*), atau struktur solid aksisimetris. 3D SHELL model digunakan untuk tipis diruang 3D. 3D SOLID model analisis digunakan untuk struktur tebal diruang 3D yang tidak memiliki penampang melintang konstan ataupun sumbu simetri. Dalam pemodelan structural pipa yang berupa profil digunakan LINE element (Saeed, 2003).

Dalam tugas akhir ini, sambungan tubular tipe K akan dimodelkan menggunakan ANSYS. Dalam *software* ANSYS dapat dilakukan pemodelan 2D ataupun 3D dengan elemen titik, elemen garis, elemen area,

dan elemen solid. Semua jenis elemen ini dapat digabungkan untuk membentuk struktur yang akan dianalisa.

Dalam perumusan metode elemen hingga, terdapat tujuh tahap yang secara umum sering digunakan, yaitu:

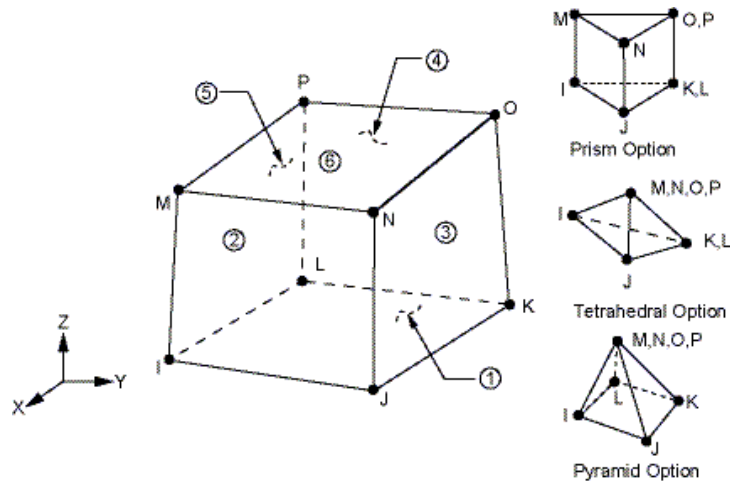
2.2.7.1 Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen

Tahap pendiskretan dan pemilihan jenis elemen pada struktur dibuat menjadi sebuah system yang ekuivalen yang terdiri dari elemen-elemen hingga yang saling dihubungkan dengan simpul. Untuk mendapatkan pendekatan yang baik, ukuran *meshing* harus dapat mewakili kondisi struktur yang sebenarnya. Elemen-elemen yang kecil digunakan untuk kondisi yang perubahannya drastic. Sedangkan elemen berukuran besar digunakan ditempat dimana besaran yang ingin dicari perubahannya relatif konstan. Ukuran *meshing* tidak harus sekecil mungkin, karena membutuhkan kapasitas hardisk dan memori yang sangat besar. Selain itu, sampai pada ukuran tertentu ukuran *meshing* akan memberikan hasil rasio yang sama atau memiliki perubahan yang kecil walupun ukurannya terus diperkecil.

Salah satu jenis elemen yang dapat dipakai untuk analisa termal sekaligus mampu mengakomodasi pemindahan hasil dari solusi *thermal* menjadi *initial load* pada solusi *thermal* adalah SOLID70. Elemen ini merupakan elemen 3D yang memiliki kemampuan untuk menghantarkan panas. Elemen ini memiliki delapan mode dengan sebuah derajat kebebasan, temperatur, pada masing-masing *node*. Elemen ini adalah elemen 3D yang mampu digunakan untuk analisa *thermal* yang *stady-state* maupun *transient*. Berikut adalah geometri dari elemen SOLID70.

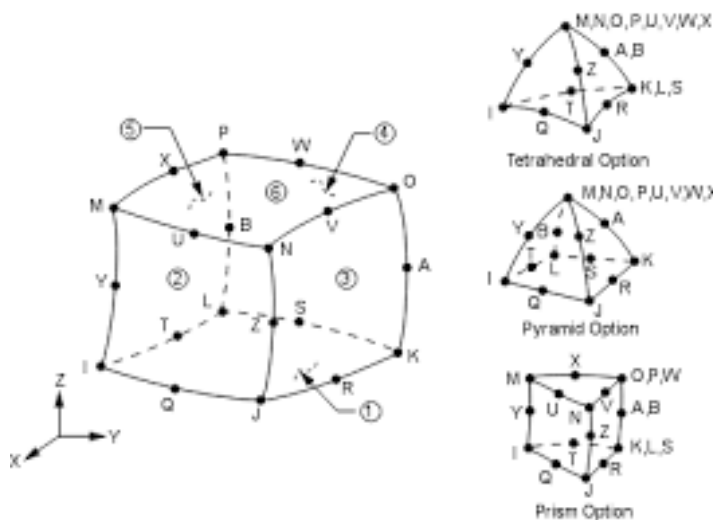
Geometri elemen, lokasi *node* dan juga system koordinat elemen SOLID70 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-11. Elemen didefinisikan dengan delapan *node* dan ortotropik *material properties*. Bentuk elemen yang dapat dibentuk oleh elemen SOLID70 diantaranya bentuk elemen prisma, tetrahedral dan juga piramida. Arah material ortotropik dapat disamakan dengan arah koordinat elemen. *Spesifik heat* dan *density* diabaikan untuk solusi *steady-state*. Jika model ini adalah elemen solid yang

dapat menghantarkan panas berarti elemen ini juga dapat dilakukan untuk analisa structural. Secara otomatis elemen ini akan digantikan dengan sebuah elemen structural yang ekuivalen, misalnya SOLID45.



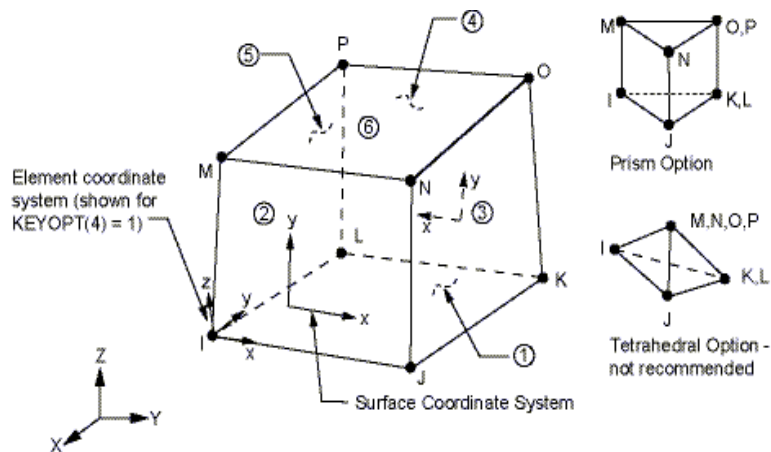
Gambar 2-11. Geometri elemen SOLID70 (*ansys.stuba.sk*)

Jenis elemen lain yang dapat dipergunakan untuk analisa termal adalah SOLID90. Elemen ini merupakan elemen yang sejenis dengan SOLID70 namun memiliki orde yang lebih tinggi. Elemen ini memiliki 20 (duapuluh) node dengan sebuah derajat kebebasan, temperatur, pada masing-masing node sehingga lebih sesuai ketika digunakan untuk menganalisa elemen-elemen yang bentuknya lebih rumit. Geometri model 3D SOLID90 ditunjukkan pada Gambar 2-12 berikut.



Gambar 2-12. Model geometri elemen SOLID90 (*ansys.stuba.sk*)

Elemen SOLID185 digunakan untuk menganalisa struktur solid. Elemen terdiri atas tiga derajat kebebasan pada tiap-tiap node yang terdiri atas translasi pada sumbu x,y, dan z. Geometri, lokasi node, dan sistem koordinat elemen diterangkan pada Gambar 2-13. Dimana elemen terdiri atas 8 node dan ortotropik. Dimana beban struktural dapat diaplikasikan pada permukaan elemen.



Gambar 2-13. Model geometri elemen SOLID185 (*ansys.stuba.sk*)

2.2.7.2 Pemilihan Fungsi Displasmen

Menentukan fungsi displasmen yang didefinisikan pada tiap elemen dengan menggunakan nilai parameter di tiap node elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polinomial, linear kuadratik, kubik, atau deret trigonometri.

2.2.7.3 Definisi Hubungan Regangan-Displasmen dan Tegangan-Regangan

Dapat ditentukan hubungan regangan akibat displasmen yang sudah ditentukan pada tahap sebelumnya. Displasmen regangan dan tegangan regangan digunakan untuk menyusun persamaan elemen hingga. Pada kasus deformasi 1-dimensi pada arah sumbu-x yang mana regangan (ϵ_x) dengan displasmen memiliki hubungan persamaan sebagai berikut:

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.12)$$

2.2.7.4 Penentuan Matriks Kekakuan Elemen dan Persamaan Elemen

Pengembangan matrik kekakuan elemen dan persamaan elemen dipengaruhi oleh nilai koefisien kekakuan. Pada analisa termal pengelasan, matrik kekakuan elemen yang digunakan didasarkan pada hukum Fourier yakni,

$$\frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} \text{ or } \mathbf{k}^{(e)} \boldsymbol{\theta}^{(e)} = \mathbf{q}^{(e)} \quad (2.13)$$

Dimana:

θ = vektor termal

k = karakteristik matrik elemen

q = vektor elemen gaya

2.2.7.5 Penggabungan Persamaan Elemen dengan Penentuan Kondisi Batas

Pada tahap ini akan didapatkan matriks kekakuan global yang bersifat singular. Kondisi batas digunakan untuk menghilangkan singularitasnya. Matriks kekakuan global didapatkan dari menggabungkan persamaan elemen pada tahap empat menggunakan metode kekakuan langsung. Pada persamaan (2.13) diatas merupakan persamaan elemen, yang mana apabila persamaan untuk tiap-tiap elemen yang digabungkan menjadi satu disebut persamaan sistem global yakni,

$$[K][\theta] = [Q] \quad (2.14)$$

Dimana,

$[K]$ = Kekakuan Global

$[\theta]$ = Global Termal

$[Q]$ = Global Force

2.2.7.6 Penyelesaian Derajat Kebebasan yang Belum Diketahui

Mendapatkan hasil besaran yang diperlukan tetapi tidak didapat secara langsung dari tahap sebelumnya. Dapat dicari dengan metode eliminasi (misalkan metode gauss) dan iterasi (misalkan metode gauss-siedel).

2.2.7.7 Penentuan Regangan dan Tegangan Elemen

Perhitungan regangan dan tegangan yang terjadi pada elemen berdasarkan hasil dari tahap enam.

2.2.7.8 Penampilan Hasil

Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafis sehingga akan mempermudah pembacaan hasil.

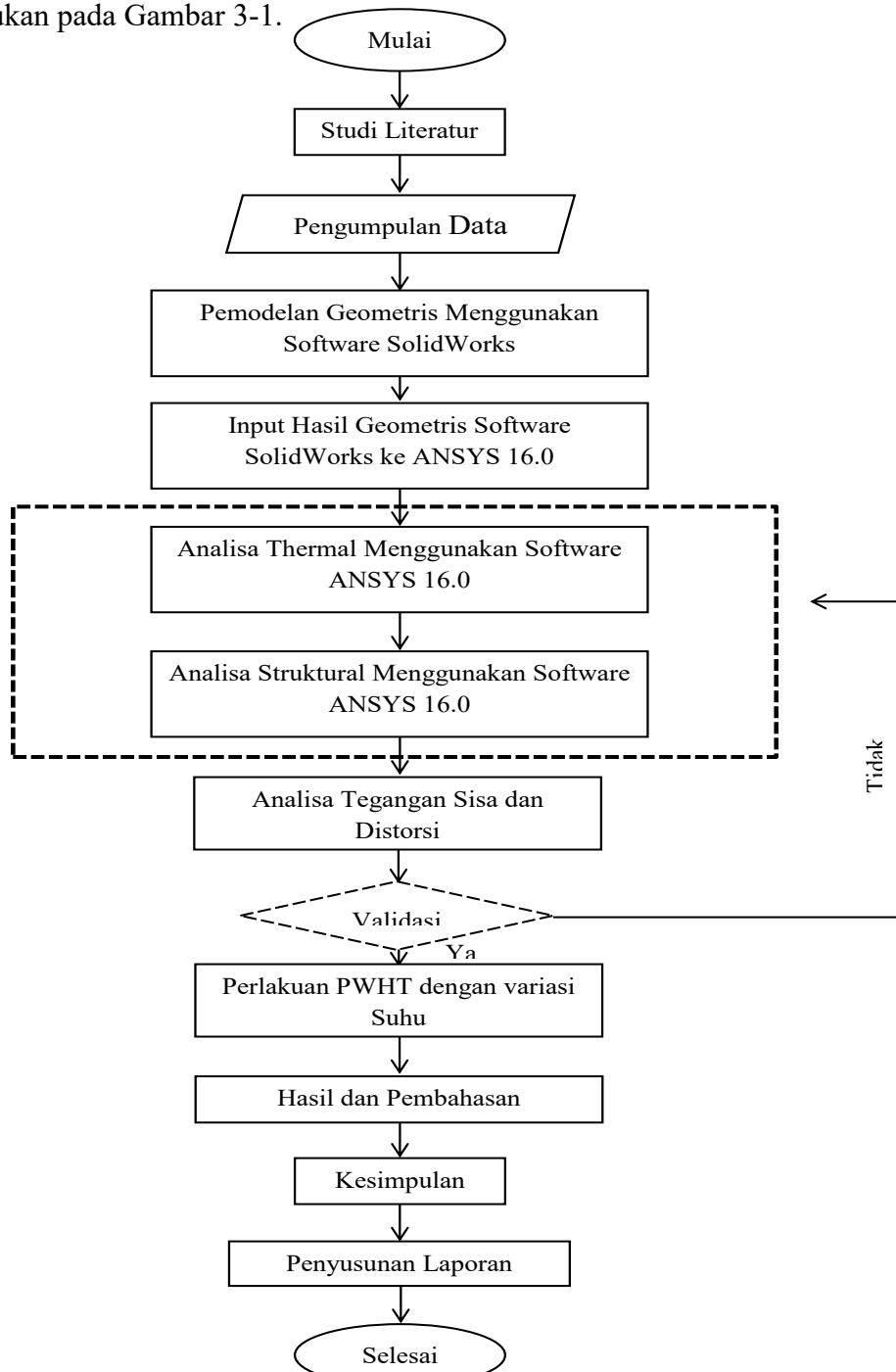
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Skema Diagram Alir

Untuk mempermudah proses pelaksanaan penelitian dalam Tugas Akhir ini, maka disusunlah alur penelitian sebagai berikut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir

3.2 Penjelasan Diagram Alir

3.2.1 Studi Literatur

Pada tahap ini berisi tentang kegiatan mencari, mengkaji, dan mengumpulkan materi serta informasi yang relevan yang dapat menjadi acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Sumber yang digunakan pada tahap studi literatur adalah materi perkuliahan, buku, jurnal lokal dan internasional, penelitian sebelumnya termasuk tugas akhir dengan topik yang berkaitan

3.2.2 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah mengacu pada WPS G15 dari PT. Gunanusa Utama Fabricators (terlampir). Untuk dimensi struktur tubular tipe K didapatkan dari *platform* Bekapai. Dimensi model tubular tipe K dan data WPS dapat dilihat pada Tabel 3-1 dan Tabel 3-2. Untuk kriteria dan spesifikasi dari *base material* adalah dari API 5L Grade B.

Tabel 3-1. Spesifikasi Model Tubular Joint K

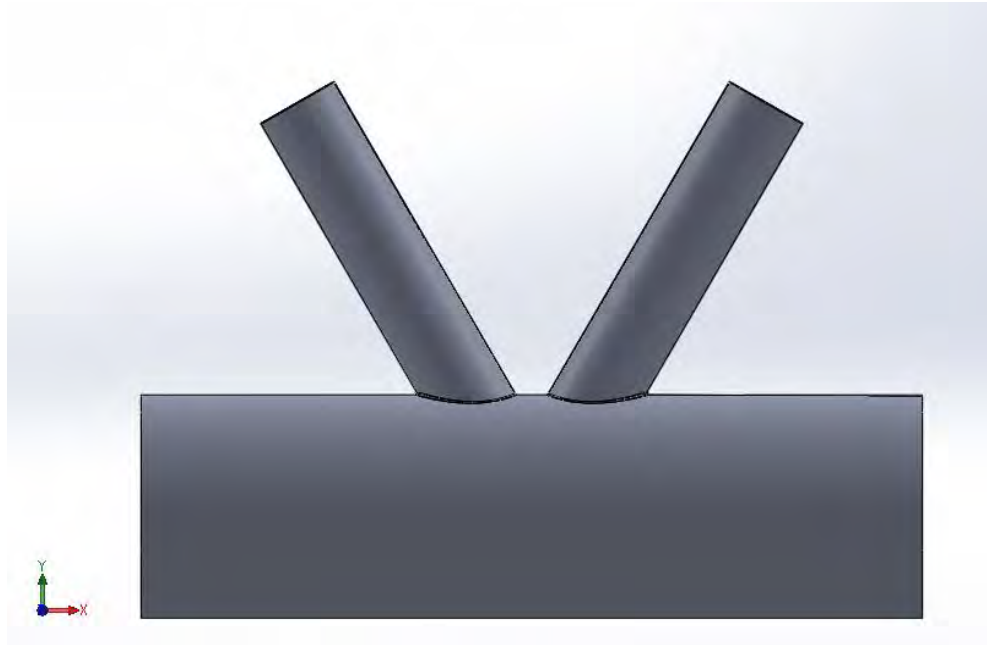
| Tipe Material | | |
|----------------|------------|-------------------------|
| API 5L Grade B | | |
| Dimensi | Chord (mm) | Brace (mm) |
| Diameter | 863,2 | 323,8 |
| Ketebalan | 25,20 | 9,53 |
| Panjang | 3000 | 1800 (dari sumbu pusat) |

Tabel 3-2. Data WPS

| No | Parameter | keterangan |
|----|-----------------------------------|------------|
| 1 | <i>Process</i> | FCAW |
| 2 | <i>Filler Metal</i> | E71T-9C |
| 3 | Diameter <i>Filler Metal</i> (mm) | 1.2 |
| 4 | Kecepatan arus (Ampere) | 148 - 209 |
| 5 | <i>Voltage</i> | 20 - 26 |
| 6 | Kecepatan pengelasan (mm/min) | 148 - 182 |
| 7 | <i>Heat Input</i> (kJ/mm) | 1.83 Max |

3.2.3 Pemodelan Geometris Sambungan Tubular Tipe K Menggunakan *Software SolidWorks*

Menggunakan *Software SolidWorks* untuk membuat bentuk geometris dari sambungan tubular K untuk *brace* dan *chord* sesuai dengan data yang ada. Hasil model geometris dapat dilihat pada Gambar 3-2.



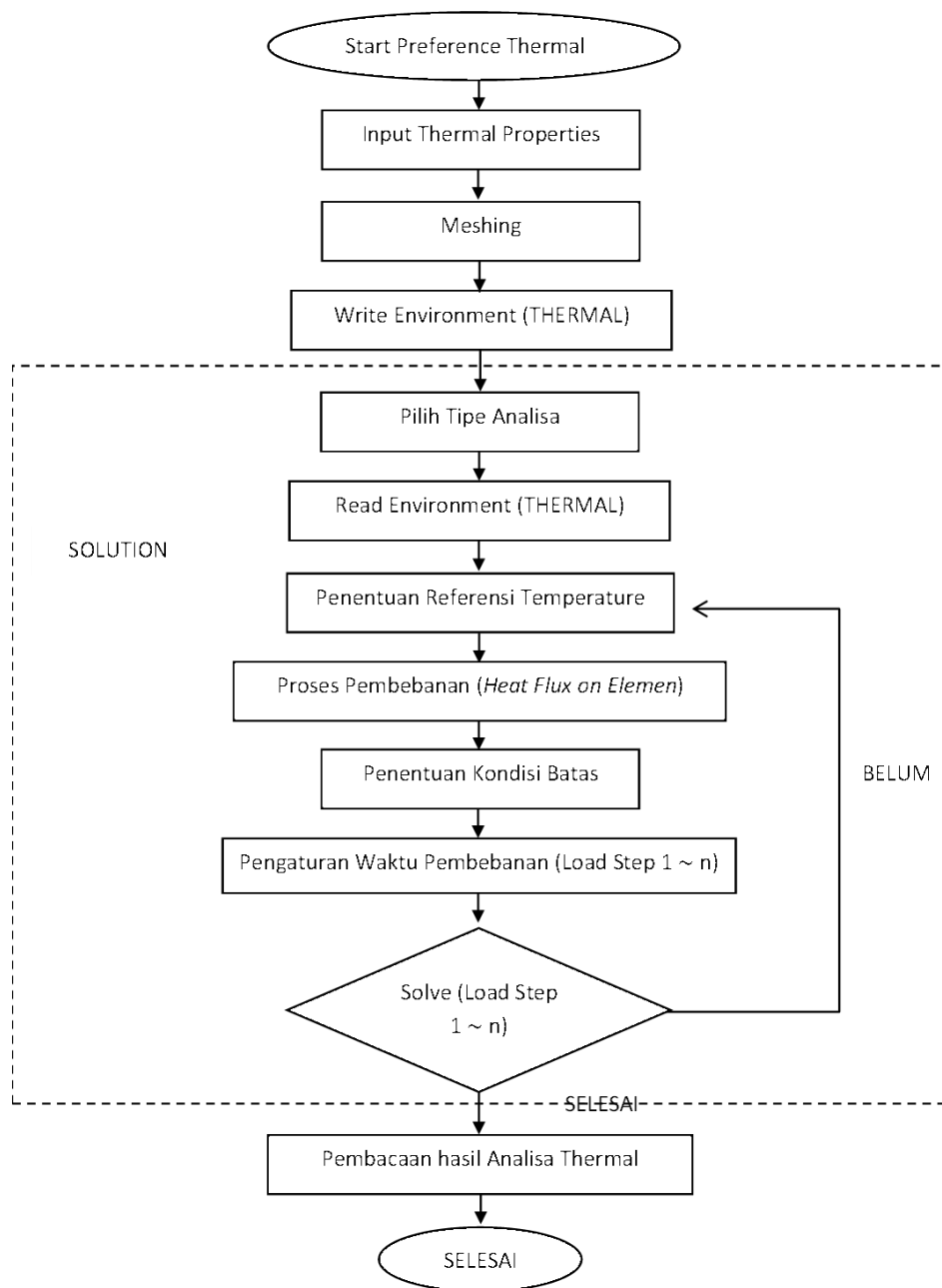
Gambar 3-2. Model geometris sambungan tubular tipe K

3.2.4 Input Hasil Geometris *Software SolidWorks* ke ANSYS 16.0

Hasil dari pemodelan geometris pada *software SolidWorks* diinputkan pada *software ANSYS 16.0*. Hasil inputan bentuk geometris pada ANSYS 16.0 harus tampak sama dengan bentuk geometris. Ketika geometri terlihat tidak sama atau gagal, maka harus kembali ke pemodelan geometri menggunakan *SolidWorks*.

3.2.5 Analisa Thermal Menggunakan *Software ANSYS 16.0*

Setelah dipastikan bentuk geometri yang akan dianalisa sesuai, maka dilakukan meshing atau pembagian struktur jadi bentuk elemen-elemen kecil. Berikutnya diinputkan data-data properties material. Selanjutnya dilakukan pembebanan panas secara *transient* sesuai dengan alur pengelasan kemudian dirunning untuk mendapatkan hasil pemodelan termal. Alur pengerjaan analisa termal diilustrasikan pada Gambar 3-3 berikut ini.



Gambar 3-3. Diagram Alir Analisa Termal

Penjelasan diagram alir analisa termal adalah sebagai berikut:

➤ *Start Preference Thermal*

Merupakan langkah awal penentuan jenis penyelesaian masalah yang akan digunakan dalam pemodelan. Dalam analisa termal ini dipilih jenis *preference thermal* dan *structural*, yang berarti dalam analisa ini dapat dilakukan pemberian beban panas pada model.

➤ *Input Material Thermal Properties*

Geometri yang telah diinputkan harus diberikan sifat material. Sifat material yang dimasukkan seperti konduktifitas, massa jenis, *thermal expansion coefficient* dan *specific heat*.

➤ *Meshing*

Sebelum melakukan meshing terlebih dahulu ditentukan jenis elemennya. Pada pemodelan sambungan tubular ini digunakan 2 jenis elemen yaitu SOLID 70 dan SOLID90, yang merupakan elemen untuk *couple analysis*. *Meshing* dilakukan dengan membagi keseluruhan model menjadi elemen-elemen kecil agar analisa dapat dilakukan secara detail pada setiap titik/nodal pada keseluruhan model. *Meshing* tersebut dapat dilakukan secara manual sesuai dengan tingkat ketelitian yang diinginkan. Semakin banyak elemen meshing yang dibuat maka semakin teliti perhitungannya.

➤ *Write Environment (Thermal)*

Write environment adalah sebuah fasilitas *library* atau penyimpanan data untuk mendukung analisa. Data yang dapat disimpan berupa sifat material dan jenis elemen yang dipakai dalam pemodelan, sehingga model dapat digunakan secara berulang tanpa perlu melakukan pembuatan kembali model dan kondisi pembebanannya.

➤ *Pilih Tipe Analisa*

Model yang telah disiapkan untuk analisa thermal juga dipersiapkan untuk analisa struktural dan karena pengelasan merupakan sebuah proses yang memiliki fungsi lokasi dan fungsi waktu, maka dalam analisa ini dipilih tipe analisa *transient*.

➤ *Read Environment (Thermal)*

Pada Tahap ini, digunakan kembali model dan properties yang telah dilakukan pada 3 tahapan diatas untuk melakukan proses pembebanan secara termal. Tahap ini dilakukan dengan cara membuka kembali *file* model dengan cara melakukan perintah *Read Environmental*.

➤ Penentuan Referensi Temperatur

Referensi temperatur yang digunakan dalam analisa ini adalah temperatur pada suhu ruang yaitu 300 K.

➤ Proses Pembebanan (*Heat Flux on Element*)

Tahap ini dapat diringkas yang kemudian dapat disebut sebagai Pembebanan thermal. Beban diaplikasikan pada *weld area*, sehingga dapat mewakili beban panas pengelasan. Beban *heat flux* ini diberikan di setiap elemen yang dilewati selama proses pengelasan. Durasi pemberian beban berdasarkan panjang elemen per kecepatan pengelasan.

➤ Penentuan Kondisi Batas

Pada pemodelan pengelasan ini terjadi proses konveksi antara permukaan sambungan tubular yang berhubungan langsung dengan udara. Kondisi batas yang digunakan adalah beban konveksi, dengan memasukkan nilai *Convective Film Coefficient*.

➤ Pengaturan Waktu Pembebanan

Setelah pemberian beban dilakukan, maka waktu pembebanan juga harus ditentukan, agar beban panas berjalan sesuai waktu simulasi pengelasan. Waktu dan langkah pembebanan direncanakan dari step 1-n.

➤ *Solve*

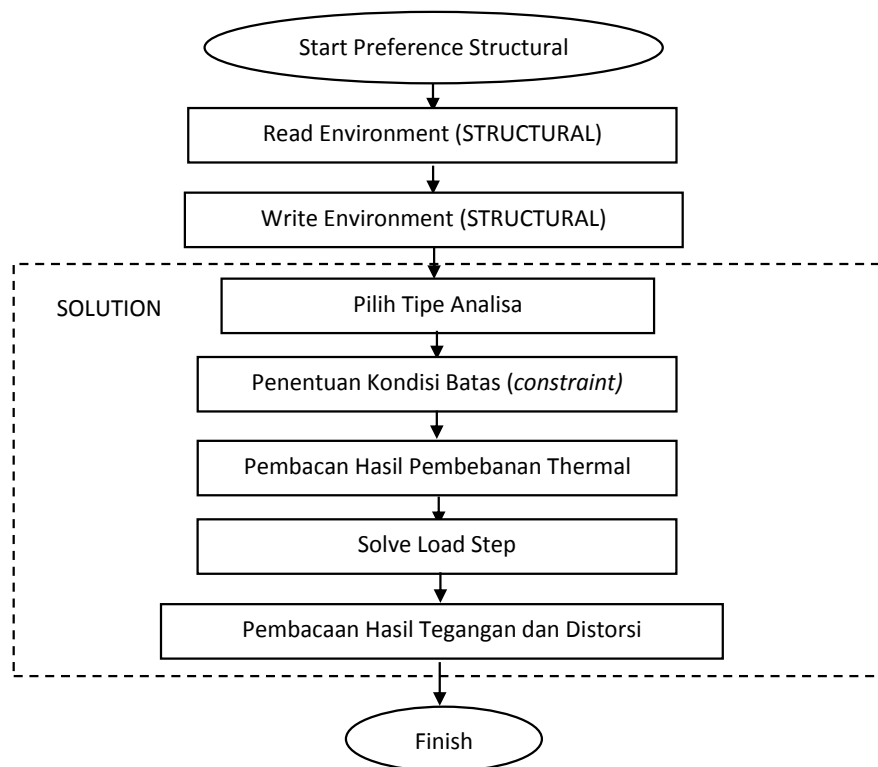
Langkah selanjutnya ketika pembebanan dan waktu pembebanan sudah selesai dilakukan adalah melakukan solusi pembebanan. *Solve Load* ini dilakukan untuk melakukan *running* terhadap model yang telah dikondisikan sesuai dengan tahapan sebelumnya. *Running* ini dilakukan dengan cara bertahap sesuai dengan tahapan pembebanan yang telah ditetapkan. *Solve load* ini dilakukan dimulai dari tahap 1 hingga tahap terakhir (n).

➤ Pembacaan Hasil Analisa Termal

Hasil dari tahap *solve* analisa thermal berupa distribusi panas yang terjadi pada material. Distribusi panas ini dapat dilihat berdasarkan fungsi waktu dan fungsi posisi. Hasil analisa termal berupa gambar distribusi panas pada model dan grafik fungsi waktu pada *node* yang dipilih.

3.2.6 Analisa Struktural Menggunakan *Software* ANSYS 16.0

Hasil dari analisa termal adalah regangan termal. Regangan termal tersebut dapat diubah menjadi regangan struktural sehingga bentuk elemen SOLID70 berubah menjadi SOLID45. Struktur tersebut lantas diberikan beban yang sesuai dengan data yang ada, kemudian *dirunning* untuk mendapatkan regangan struktural dan juga bentuk distorsi yang dialami struktur. Dari regangan struktur tersebut dapat diperoleh tegangan sisa. Penjelasan langkah analisa struktural dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3-4 berikut.



Gambar 3-4. Diagram Alir Analisa Struktural

Penjelasan diagram alir analisa struktural (Gambar 3-4) adalah sebagai berikut:

➤ *Start Preference Structural*

Setelah analisa termal dilakukan selanjutnya adalah melakukan analisa struktural. Seperti pada tahap analisa termal pada tahap analisa struktural ini

jenis penyelesaian struktural, pada kotak dialog *Preference* dapat dipilih *Structural*.

➤ *Read Environment (Structural)*

Pada tahap ini, digunakan kembali model dan *properties* yang telah dilakukan pada tahapan termal sebelumnya untuk melakukan proses pembebanan secara struktural. Tahap ini dilakukan dengan cara membuka kembali file model pada tahap termal sebelumnya dengan cara melakukan perintah *Read Environmental*.

➤ *Write Environment (Structural)*

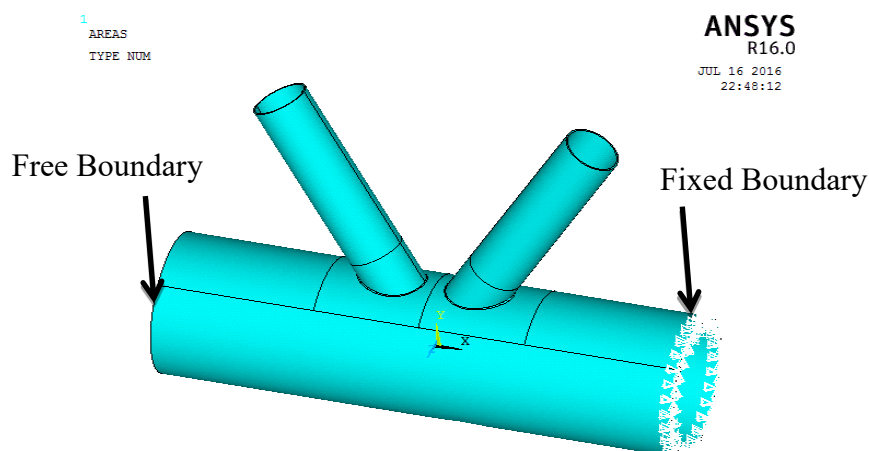
Setelah terbaca data material dan jenis elemen model kemudian penamaan analisa termal sebelumnya dapat diganti dengan penamaan analisa struktural. Tahap ini dilakukan dengan cara melakukan perintah *Write Environmental*.

➤ Pilih Tipe Analisa

Pada analisa struktural, tipe analisa yang dipilih adalah analisa jenis *transient*

➤ Penentuan Kondisi Batas *Apply Displacement (Constraint)*

Pada tahap ini, material diberikan faktor faktor kondisi batas yang berupa tumpuan dibawah objek las. Tahap dilakukan sehingga pada saat proses komputasi, software tidak menghitung kebebasan distorsi ke seluruh arah namun terdapat fiksasi pada bagian samping salah satu dari material dengan nilai pergerakan arah X, Y dan Z senilai 0 (nol). Aplikasi *boundary condition* dapat dilihat pada Gambar 3-5.



Gambar 3-5. Aplikasi *Boundary Condition* pada ANSYS Mechanical APDL

➤ **Pembacaan Hasil Pembebanan Termal**

Input analisa struktural adalah data pembebanan termal dari analisa termal. Pada tahapan ini pembebanan yang dikenakan pada material adalah beban termal namun, dikalkulasikan terhadap kondisi struktural. Pelaksanaan tahapan ini berdasarkan *load step* yang telah dibuat. Proses pembebanan ini dilakukan secara berulang dari *load step* 1 sampai *load step* ke-n.

➤ ***Solve Load Step***

Load ini dilakukan untuk melakukan *running* terhadap model yang telah dikondisikan sesuai dengan tahapan sebelumnya. *Running* ini dilakukan dengan cara bertahap sesuai dengan tahapan pembebanan dimulai dari tahap 1 hingga tahap terakhir (n). Tahap ini merupakan proses solusi pembebanan untuk mendapatkan reaksi terhadap pembebanan. Reaksi yang didapatkan berupa tegangan sisa dan distorsi.

➤ **Pembacaan Hasil Tegangan dan Distorsi**

Hasil dari tahap *solve* analisa struktural berupa tegangan dan distorsi yang terjadi pada material. Distorsi ini dapat dilihat berdasarkan fungsi waktu dan fungsi posisi. Hasil analisa struktural berupa Gambar tegangan sisa pada model dan grafik fungsi waktu pada *node* yang dipilih.

3.2.7 Perlakuan PWHT dan Variasi Temperatur

Hasil dari tegangan sisa yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan model geometri yang dianalisa secara termal dan struktural dengan ditambahi variasi PWHT. Variasi PWHT yang dimaksud adalah variasi dari suhu pemanasan. Hasil dari pemodelan dengan variasi PWHT ini nantinya akan dapat diketahui seberapa besar pengurangan tegangan sisa sebelum dan sesudah diberi perlakuan PWHT. Model variasi yang akan digunakan akan ditunjukkan pada Tabel 3-3.

Tabel 3-3. Variasi Suhu dan *Holding Time* pada pemodelan

| No. | Suhu (°C) | Suhu (K) | Waktu tahan (jam) |
|-----|-----------|----------|--------------------|
| 1. | 255 | 528 | 1 |
| 2. | 315 | 588 | 1 |
| 3. | 375 | 648 | 1 |

3.2.8 Tegangan Sisa setelah PWHT

Setelah melakukan tahap pemvariasian suhu pada proses PWHT, pada tahap ini nantinya akan dianalisa perbandingan tegangan sisa sebelum dan sesudah variasi PWHT.

3.2.9 Analisa dan Pembahasan

Dalam tahap ini akan dilakukan pembahasan hasil pemodelan sambungan tubular tipe K hasil pengelasan dan hasil pemodelan ketika sambungan diberi perlakuan PWHT. Hasil analisa tanpa dan dengan PWHT tentunya akan menghasilkan nilai tegangan sisa yang berbeda.

3.2.10 Kesimpulan

Hasil analisa dari tugas akhir ini adalah tegangan sisa dan bentuk distorsi dari struktur sehingga permasalahan yang dirumuskan dalam tugas akhir ini dapat terpecahkan.

3.2.11 Penyusunan Laporan

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Struktur

Pada model sambungan tubular tipe K yang diambil dari *platform* Bekapai, pemodelan dilakukan menggunakan *software SolidWork* untuk mendapatkan bentuk geometri model sambungan tubular tipe K. Dimana nantinya geometri model ini akan diinputkan pada *software ANSYS Mechanical APDL 16.0* untuk dianalisa tegangan sisa dan distorsi hasil simulasi pengelasan. Data geometri sambungan tubular tipe K dan parameter pengelasan tertera pada Tabel 4-1 dan Tabel 4-2.

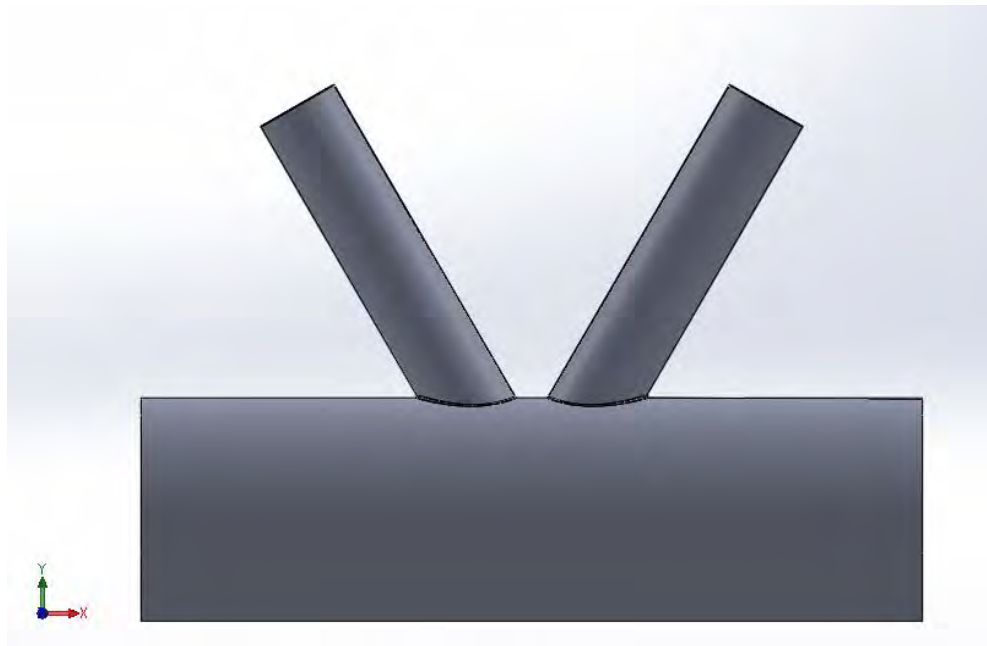
Tabel 4-1. Ukuran Geometri Tubular Joint K

| Tipe Material | | |
|----------------|-------------------|-------------------------|
| API 5L Grade B | | |
| Dimensi | <i>Chord</i> (mm) | <i>Brace</i> (mm) |
| Diameter | 863,2 | 323,8 |
| Ketebalan | 25,20 | 9,53 |
| Panjang | 3000 | 1800 (dari sumbu pusat) |

Tabel 4-2. Parameter Pengelasan

| No | Parameter | keterangan |
|----|-----------------------------------|------------|
| 1 | Process | FCAW |
| 2 | <i>Filler Metal</i> | E71T-9C |
| 3 | Diameter <i>Filler Metal</i> (mm) | 1.2 |
| 4 | Kecepatan arus (Ampere) | 148 - 209 |
| 5 | <i>Voltage</i> | 20 - 26 |
| 6 | Kecepatan pengelasan (mm/min) | 148 - 182 |
| 7 | <i>Heat Input</i> (kj/mm) | 1.83 Max |

Hasil pemodelan pada software SolidWork untuk sambungan tubular tipe K dapat dilihat pada Gambar 4-1 di bawah ini.



Gambar 4-1. Model geometris sambungan tubular tipe K tampak depan.

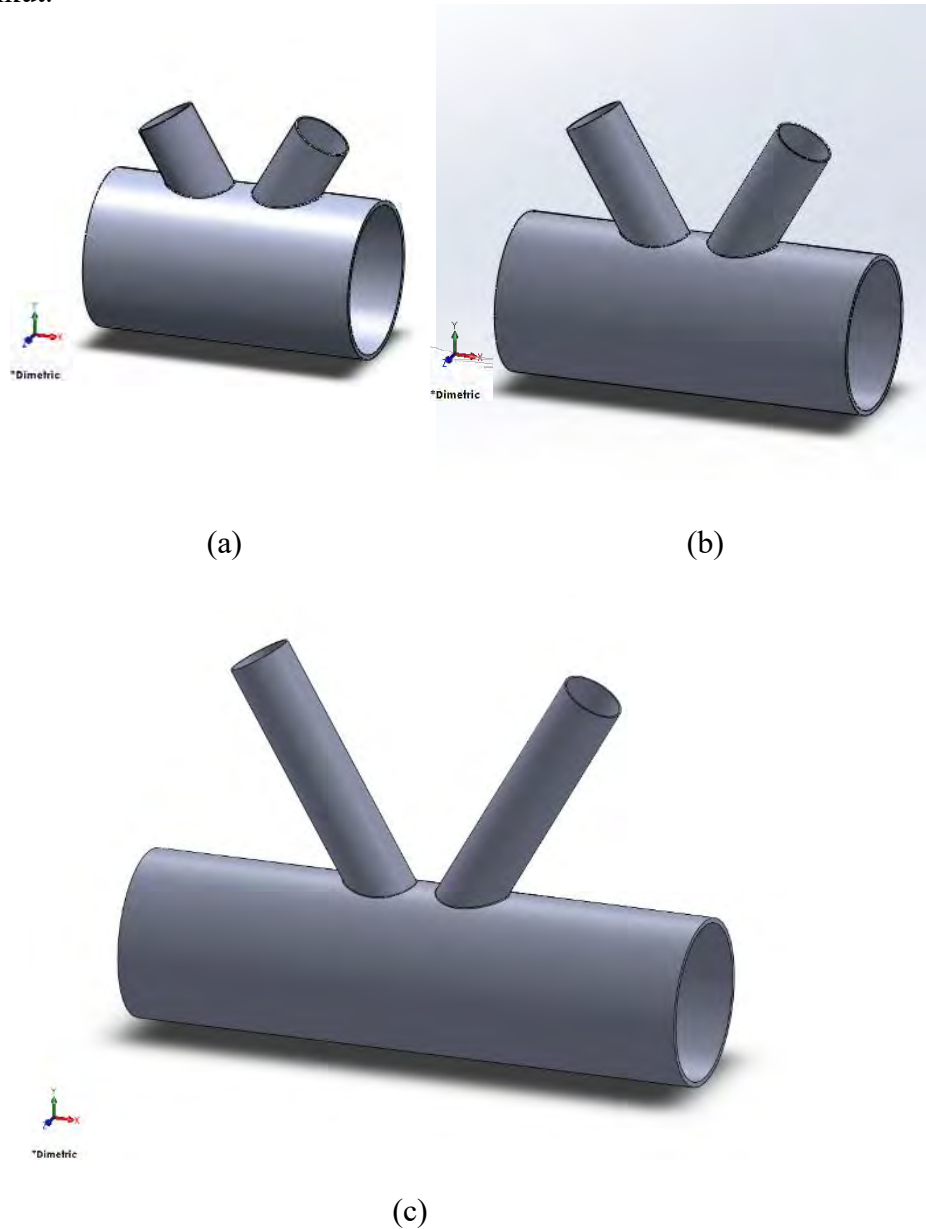
4.2 Analisa Geometri

Bagian terpenting dalam analisa pemodelan adalah bentuk dari meshing yang digunakan. Tujuan dari meshing adalah membagi keseluruhan model menjadi elemen-elemen kecil yang sama agar analisa dapat dilakukan secara detail pada setiap titik/nodal keseluruhan model. Pemilihan meshing berpengaruh pada hasil *output*, jumlah elemen dan *nodes*, waktu simulasi, ketelitian analisa, dll. Pada simulasi pemodelan ini digunakan 2 tipe elemen *meshing* yaitu hexahedral (elemen brick) dan tetrahedral (elemen prisma) atau jika dalam *software ANSYS* disebut sebagai elemen SOLID70 dan SOLID90.

4.2.1 Perbandingan Model Geometri

Dalam mendapatkan potongan model geometri yang digunakan untuk analisa distribusi temperature dan tegangan sisa, sebelumnya dilakukan percobaan mengenai panjang *chord* dan *brace*. Panjang *chord* dan *brace* ini menentukan bagaimana distribusi temperatur dan tegangan sisa yang mendekati kondisi sesungguhnya saat dilakukan simulasi pengelasan. Dalam membandingkan panjang *chord* dan *brace* tersebut terdapat beberapa variable control yang dibuat sama yakni, jenis dan spesifikasi material, ukuran elemen atau *meshing*, pembebanan panas juga kondisi batas. Perbandingan model geometri panjang *chord* dan *brace* yang divariasikan adalah sebagai berikut; pada percobaan 1 panjang *chord* 1,52

m dan *brace* 1,2 m dari sumbu pusat, untuk percobaan 2 panjang *chord* dan *brace* adalah 2 m dan 1,4 m dari sumbu pusat sedangkan untuk percobaan 3 panjang *chord* dan *brace* adalah 3 m dan 1,8 m dari sumbu pusat. Bentuk dari hasil pmodelan ketiga percobaan tersebut ditampilkan pada Gambar 4-2 berikut.



Gambar 4-2. Perbandingan model geometri sambungan tubular tipe K untuk (a) Percobaan 1, (b) Percobaan 2 dan (c) Percobaan 3

Untuk simulasi pengelasan pada ketiga percobaan diatas terdapat 41 *Load Step* pembebanan dengan *meshing* yang digunakan adalah 0,1 m (global) dan 0,02 m (*weld area*), inputan *Heatflux* sebesar 12.215.932,63

Watt/m². Sehingga hasil perbandingan distribusi panas dan tegangan sisa seperti yang disajikan pada Tabel 4-3 berikut.

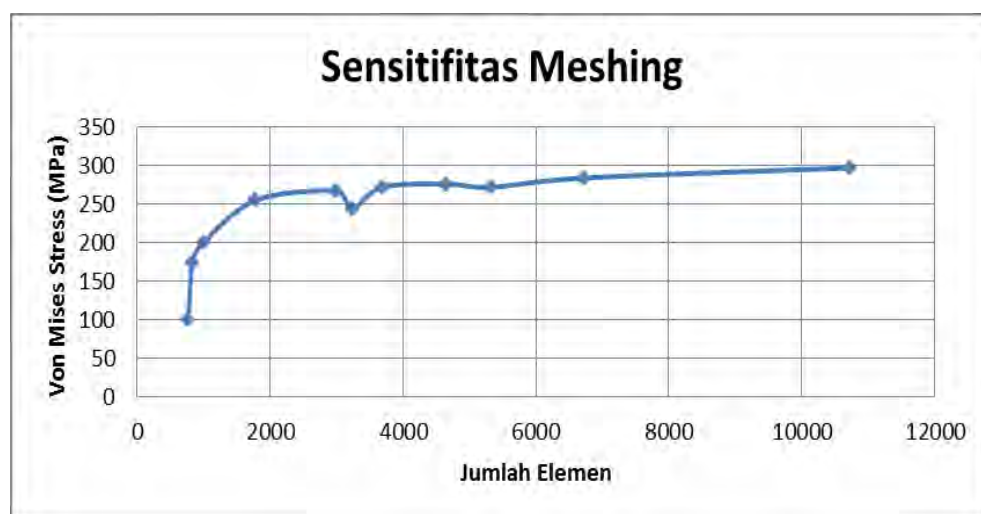
Tabel 4-3. Hasil perbandingan model geometri sambungan tubular tipe K

| | Suhu maksimum | Deformasi | Maksimum tegangan sisa |
|-------------|---------------|-----------|------------------------|
| Percobaan 1 | 3200 K | 00,45 m | 360 Mpa |
| Percobaan 2 | 2800 K | 0,039 m | 320 Mpa |
| Percobaan 3 | 2400 K | 0,03 m | 297 Mpa |

Pada kondisi pengelasan sesungguhnya, rentang suhu maksimum pengelasan atau suhu maksimum titik lebur logam adalah berkisar antara 1800 K sampai 2500 K, untuk tegangan sisa yang diperkebankan adalah tidak melebihi *yield stress* material, dalam penelitian ini adalah 320 Mpa. Sehingga dari ketiga percobaan diatas didapatkan bahwa percobaan 3 adalah model geometri sambungan tubular tipe K yang paling mendekati kondisi pengelasan sesungguhnya, dan percobaan 3 inilah yang seterusnya digunakan sebagai model sambungan tubular tipe K untuk dianalisa lebih lanjut.

4.2.2 Sensitifitas Meshing

Tujuan dari sensitifitas meshing ini adalah untuk mencari akurasi ukuran yang tepat pada elemen dengan cara melakukan pengubahan ukuran elemen secara iteratif sehingga nantinya akan didapatkan hasil yang konstan. Pemodelan ini membandingkan antara penambahan jumlah *node* dengan output tegangan sisa, yang dapat dilihat pada Gambar 4-3 berikut.

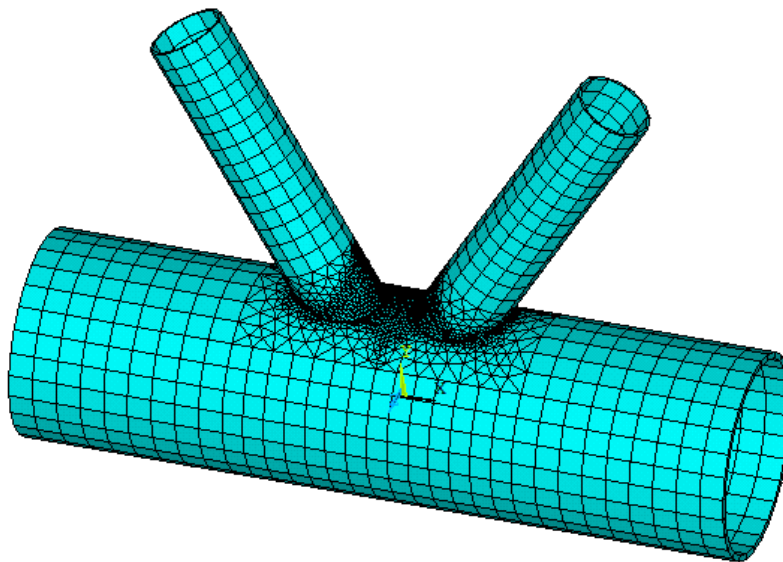


Gambar 4-3. Grafik Sensitifitas Meshing

Pada Gambar 4-2 menunjukkan penambahan jumlah elemen berbanding lurus dengan tegangan sisa yang dihasilkan. Semakin banyak elemen maka akan semakin meningkat besar tegangan sisa. Penambahan jumlah elemen ini berpengaruh pada *solving time* yang makin lama. Namun dapat dilihat pada Gambar 4-2 pada jumlah elemen sekitar 10.700 tegangan sisa telah mencapai titik kritis yaitu meskipun jumlah elemen bertambah tidak ada peningkatan besar tegangan sisa yang signifikan. Maka dari itu ukuran meshing yang digunakan untuk simulasi numerik pada penelitian ini adalah 8 cm dan 10 cm untuk hexahedral dan 2 cm untuk tetrahedral seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-4 berikut.

1
ELEMENTS

ANSYS
R16.0
JUL 16 2016
23:46:59



Gambar 4-4. Meshing

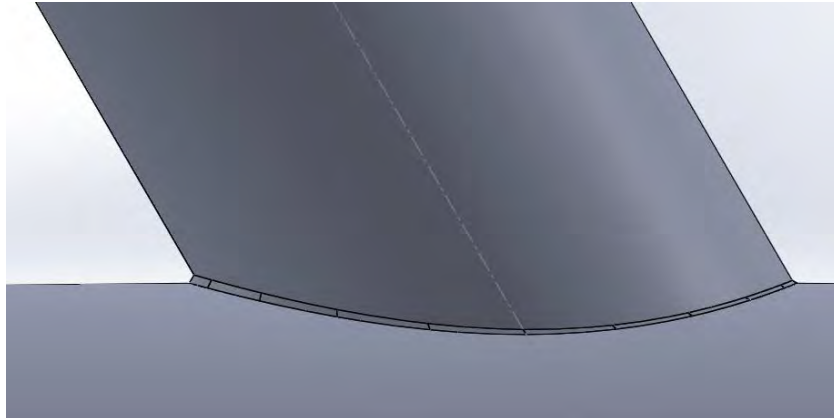
4.3 Analisa Thermal

4.3.1 Perhitungan Beban Heat Flux

Setelah pemodelan dilakukan, maka untuk mendapatkan simulasi persebaran atau distribusi panasnya perlu dihitung masukan dari *heat flux* terlebih dahulu. Perhitungan *heat flux* yang ditinjau adalah perelement. Parameter pengelasan yang dipakai yaitu pengelasan dengan metode FCAW. Perhitungan besarnya beban *heat flux* yang diaplikasikan pada *area* model dapat dihitung dengan persamaan 2.5. Dimana untuk mendapatkan A_1 bisa digunakan persamaan trapesium berikut :

$$A_1 = \frac{p_1 + p_2}{2} \times l \quad (4.1)$$

Dimana, panjang p_1 dan p_2 merupakan panjang dari satu area *weld* atau *chamfer*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-5.



Gambar 4-5. Area chamfer sambungan tubular tipe K

Sehingga hasil perhitungan didapatkan:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= ((p_1 + p_2)/2) \times l \\
 &= ((62,98 + 64,46)/2) \times 10,89 \\
 &= 693,912 \text{ mm}^2 \\
 &= 23,130 \text{ mm}^2 \text{ (tiap 30 element)}
 \end{aligned}$$

- *Heat input* pengelasan dapat dihitung dengan persamaan 2.3. Sehingga didapatkan besar heat input (Q) = 2368 Watt
- *Heat flux* elektroda dihitung dengan rumus:

$$q_e = \frac{Q}{A_e} \quad (4.2)$$

Dimana A_e adalah luas permukaan elektroda yang mengenai material dan Q adalah heat input pengelasan. Sehingga dari persamaan 4.4 didapatkan besar heat flux elektroda adalah 2094,834 watt/mm².

Maka selanjutnya dapat dihitung luas *flux* yang dihasilkan elektroda dengan persamaan 2.7

$$A_f = b \times v \times t \quad (4.3)$$

Dimana, b adalah panjang elemen sebesar 62,98 mm, v adalah kecepatan pengelasan sebesar 3,033 mm/second, dan t adalah waktu pengelasan 20,8 second perweld area. Sehingga didapatkan luas *flux* yang dihasilkan elektroda adalah 3966,480 mm².

Setelah parameter-parameter yang dibutuhkan telah didapat, maka didapat besar heat flux elemennya $q_1 = 12,216 \text{ Watt/mm}^2$ atau 12.215.932,63 Watt/m².

Selain pengaplikasian beban *heat flux*, dilakukan pemberian beban konveksi sesuai dengan kondisi batas analisa termal. Kondisi batas pada analisa termal berupa proses konveksi antara permukaan sambungan tubular dengan udara sekitar. Untuk mensimulasikan proses konveksi yang terjadi maka dilakukan input koefisien konveksi, yang bernilai:

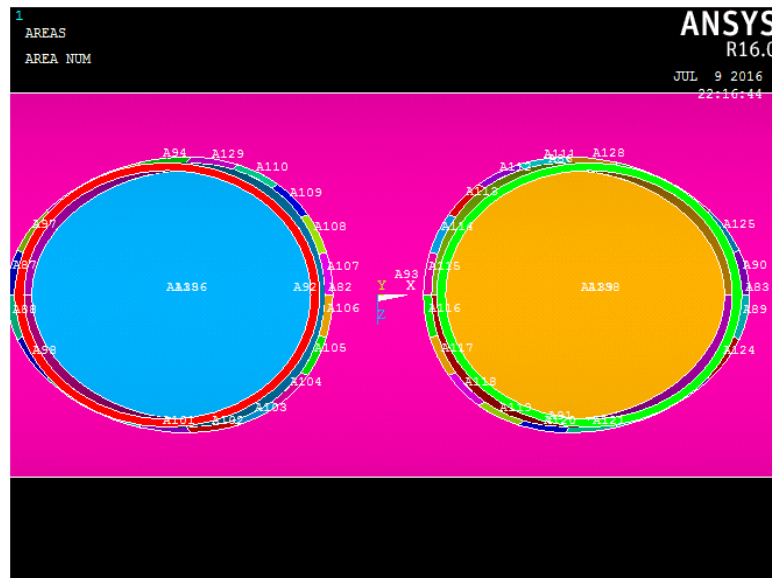
$$\begin{aligned}
 \text{Film Coefficient} &= 15 \text{ W/m}^2\text{K} \\
 \text{Bulk Temperatur} &= 300 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Nilai koefisien konveksi ini menggambarkan seberapa besar panas dari udara sekitar yang mengenai permukaan sambungan tubular secara

langsung. *Bulk temperature* merupakan temperatur saat pengelasan dilakukan, diasumsikan sebesar suhu ruang 300 K.

4.3.2 Analisa Distribusi Panas

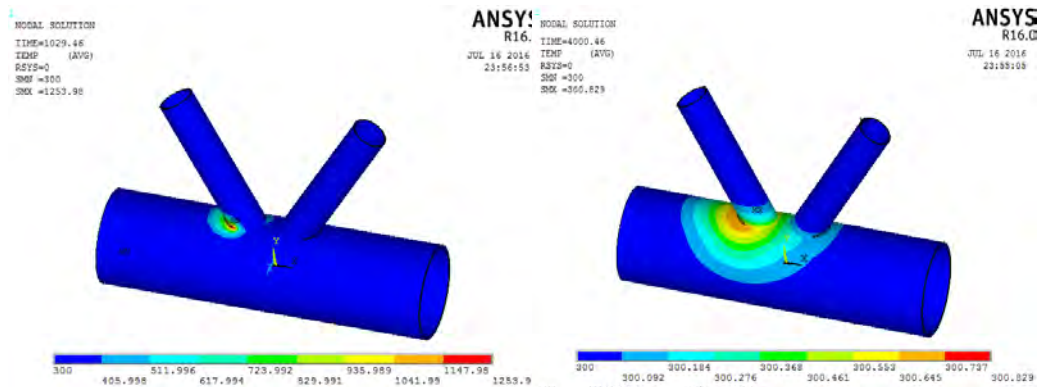
Setelah dihitung besar *heat flux* per-element, model geometris sambungan tubular tipe K diinputkan kedalam *software* ANSYS APDL 16.0 untuk dianalisa secara thermal sehingga menghasilkan distribusi panas dan regangan panas. Hasil yang didapatkan berupa grafik antara *increment* waktu pengelasan dengan suhu pada waktu tersebut. Pada simulasi pengelasan model tubular tipe K ini area pengelasan dibagi menjadi 40 area pembebanan dimana masing-masing *brace* terdapat 20 area pembebanan seperti ditunjukkan Gambar 4-6. Untuk simulasi pengelasan dilakukan sebanyak 41 *load step* dimana *load step* ke 41 adalah *load step* untuk pendinginan (setelah pengelasan). Tabel 4-4 menunjukkan *load step* pengelasan dan ilustrasi pengelasan ditunjukkan pada Gambar 4-7.



Gambar 4-6. Area Pembebanan

Tabel 4-4. Load Step Pembebanan

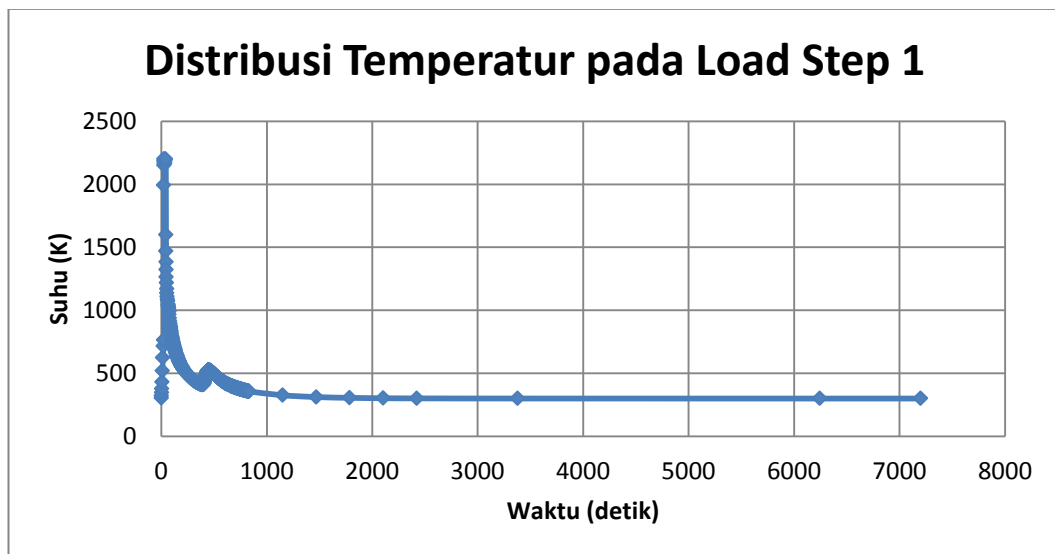
| <i>Brace Kiri</i> | | | <i>Brace Kanan</i> | | |
|-------------------|---------------|-----------------|--------------------|---------------|-----------------|
| Nomor Load Step | Waktu (detik) | Area Pembebanan | Nomor Load Step | Waktu (detik) | Area Pembebanan |
| Load Step 1 | 20,8 | 20 | Load Step 21 | 436,8 | 63 |
| Load Step 2 | 41,6 | 19 | Load Step 22 | 457,6 | 62 |
| Load Step 3 | 62,4 | 18 | Load Step 23 | 478,4 | 61 |
| Load Step 4 | 83,2 | 17 | Load Step 24 | 499,2 | 60 |
| Load Step 5 | 104 | 16 | Load Step 25 | 520 | 59 |
| Load Step 6 | 124,8 | 15 | Load Step 26 | 540,8 | 58 |
| Load Step 7 | 145,6 | 14 | Load Step 27 | 561,6 | 57 |
| Load Step 8 | 166,4 | 13 | Load Step 28 | 582,4 | 56 |
| Load Step 9 | 187,2 | 12 | Load Step 29 | 603,2 | 55 |
| Load Step 10 | 208 | 11 | Load Step 30 | 624 | 54 |
| Load Step 11 | 228,8 | 10 | Load Step 31 | 644,8 | 53 |
| Load Step 12 | 249,6 | 9 | Load Step 32 | 665,6 | 76 |
| Load Step 13 | 270,4 | 32 | Load Step 33 | 686,4 | 71 |
| Load Step 14 | 291,2 | 27 | Load Step 34 | 707,2 | 70 |
| Load Step 15 | 312 | 26 | Load Step 35 | 728 | 69 |
| Load Step 16 | 332,8 | 25 | Load Step 36 | 748,8 | 68 |
| Load Step 17 | 353,6 | 24 | Load Step 37 | 769,6 | 67 |
| Load Step 18 | 374,4 | 23 | Load Step 38 | 790,4 | 66 |
| Load Step 19 | 395,2 | 22 | Load Step 39 | 811,2 | 65 |
| Load Step 20 | 416 | 21 | Load Step 40 | 832 | 64 |



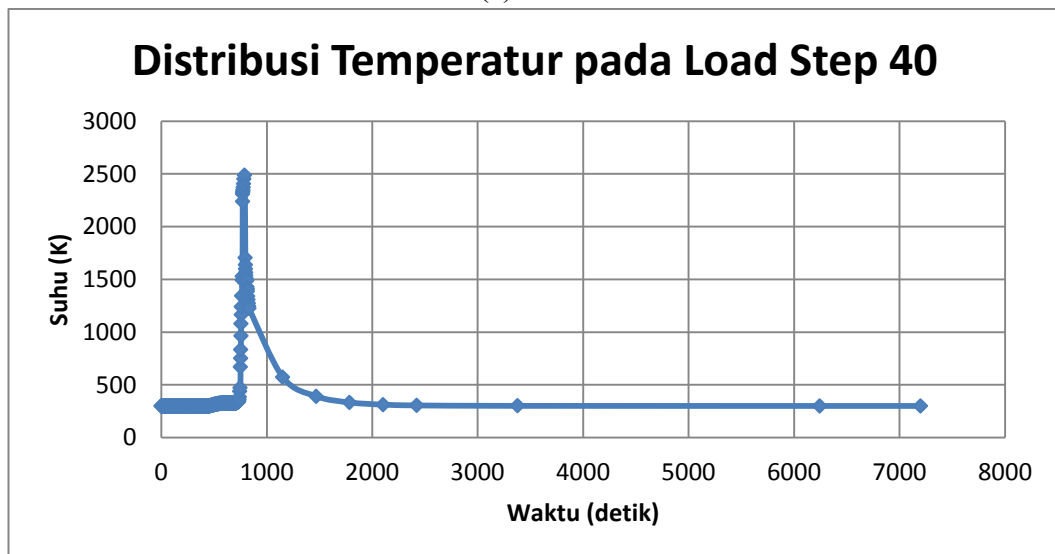
Gambar 4-7. Ilustrasi Pengelasan (kiri) Kondisi akhir pengelasan (kanan)

Distribusi panas ditinjau dari beberapa titik pada area pengelasan untuk mendapatkan suhu pengelasan yang terjadi. Pada laporan penelitian ini distribusi panas ditinjau pada titik awal pengelasan dan akhir pengelasan, yaitu pada *nodes* 4406 dan 14187. Grafik distribusi panas ditunjukkan pada Gambar 4-8.

Seperti yang terlihat pada Gambar 4-8 bahwa temperatur pada titik awal pengelasan (*load step* 1) adalah sekitar 2200 K kemudian turun hingga suhu 400 K dan naik kembali hingga suhu sekitar 600 K untuk kemudian suhu turun hingga mencapai suhu *ambient* 300 K sampai akhir waktu pendinginan. Sedangkan distribusi temperatur pada titik akhir pengelasan (*load step* 40) suhu maksimum mencapai 2500 K kemudian turun ke suhu ambientnya 300K sampai akhir waktu pendinginan. Dari grafik distribusi panas tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk simulasi pengelasan pada sambungan tubular tipe K ini mendekati kondisi aslinya, dikarenakan untuk suhu pengelasan atau titik leleh logam untuk material baja adalah berkisar 1800K sampai 2500 K.



(a)

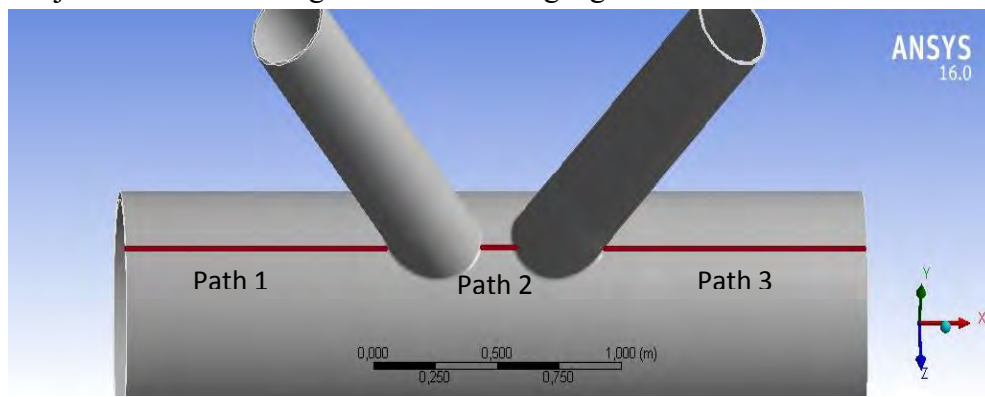


(b)

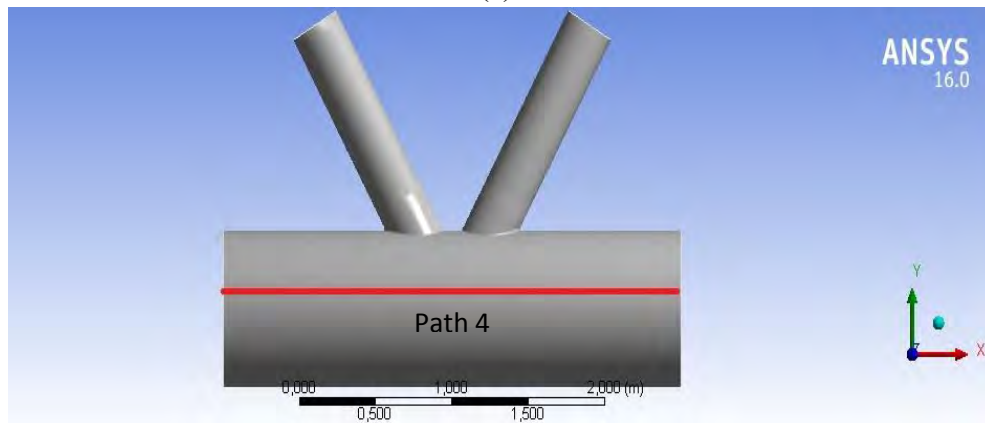
Gambar 4-8. Distribusi temperatur pada (a) *LoadStep* 1 dan (b) *LoadStep* 40

4.4 Analisa Tegangan Sisa

Untuk mendapatkan besar tegangan sisa harus merubah hasil dari analisa termal yang berupa regangan menjadi tegangan. Analisa tegangan sisa yang ditinjau adalah tegangan sisa pada bagian *chord*, yaitu bagian atas dan tengah *chord* sambungan tubular tipe K. Jenis tegangan sisa yang dianalisa adalah tegangan sisa axial. *Pathline* operations digunakan sebagai fasilitas untuk meninjau daerah *chord* yang akan dianalisa tegangan sisanya. Pada penelitian tugas akhir ini akan ditinjau menjadi 4 path yang terdiri dari 3 path pada bagian atas *chord* dan 1 path untuk bagian tengah *chord*. Berikut adalah penggambaran visual *path* yang diilustrasikan seperti pada Gambar 4-9. Hasil distribusi tegangan sisa dari masing-masing *path* disajikan dalam bentuk grafik distribusi tegangan sisa.



(a)



(b)

Gambar 4-9. Pathline untuk pembacaan tegangan sisa (a) pada bagian atas *chord* dan (b) pada bagian tengah *chord*

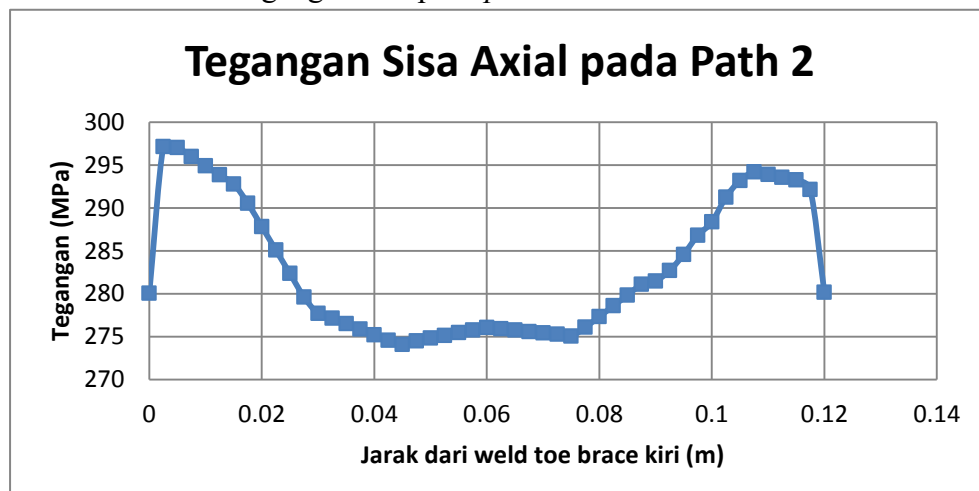
- Distribusi tegangan sisa pada *path 1*



Gambar 4-10. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas *chord* (*path1*)

Pada Gambar 4-10 terlihat bahwa untuk *path 1* memiliki tegangan aksial dominan yang berupa tegangan tarik. Semakin kearah daerah pengelasan (*weld toe*) tegangan sisa yang dihasilkan semakin besar hingga mencapai sekitar 293,32 Mpa dititik 0,155 m atau 15,5 cm dari *weld toe*. Hal ini dikarenakan pada sekitar daerah pengelasan masih terpengaruh oleh beban panas saat pengelasan. Sedangkan daerah yang jauh dari daerah pengelasan (*weld toe*) tegangan sisa bisa mencapai 0 karena tidak mendapat pengaruh beban panas. Untuk titik 1,5 m dari *weld toe* tegangan sisa bernilai -3,423 Mpa.

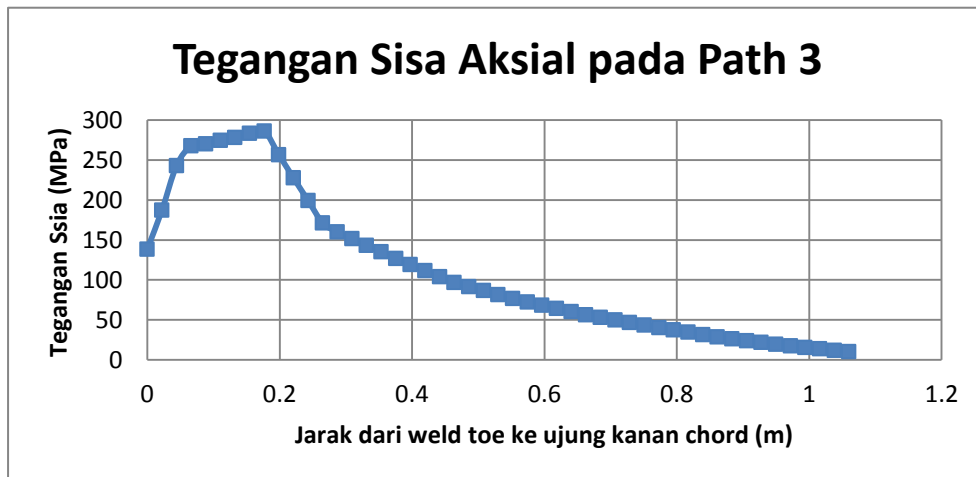
- Distribusi tegangan sisa pada *path 2*



Gambar 4-11. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas *chord* (*path 2*)

Pada Gambar 4-11 terlihat bahwa untuk *path 2* memiliki tegangan aksial yang berupa tarik. *Path 2* merupakan daerah *gap* antar *brace* sehingga tegangan yang terjadi di daerah ini sangat besar dan saling mempengaruhi satu sama lain. Tegangan sisa yang dihasilkan sebesar 297,14 Mpa dititik 0.05 m atau 5 cm dari *weld toe brace* kiri. Sedangkan untuk tegangan sisa minimum pada *path 2* adalah sebesar 274,11 Mpa. Hal ini dikarenakan pada sekitar daerah pengelasan masih terpengaruh oleh beban panas saat pengelasan untuk *brace* kanan.

- Distribusi tegangan sisa pada *path 3*



Gambar 4-12. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas *chord* (*path 3*)

Pada Gambar 4-12 terlihat bahwa untuk *path 3* memiliki tegangan aksial yang berupa tarik. Arah pengukuran dari *path 3* ini adalah dari *weld toe* menuju ujung *chord* sebelah kanan, sehingga ke arah ujung *chord* tegangan sisa yang dihasilkan semakin kecil. Tegangan sisa terbesar ada di 0,044 m dari *weld toe* yaitu sebesar 282,59 Mpa dan tegangan sisa minimum adalah 10,215 MPa.

- Distribusi tegangan sisa pada *path* 4

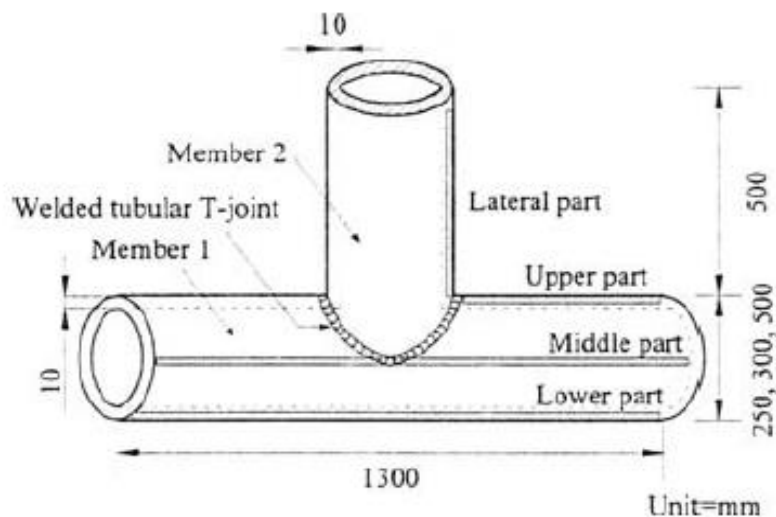


Gambar 4-13. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas *chord* (*path* 4)

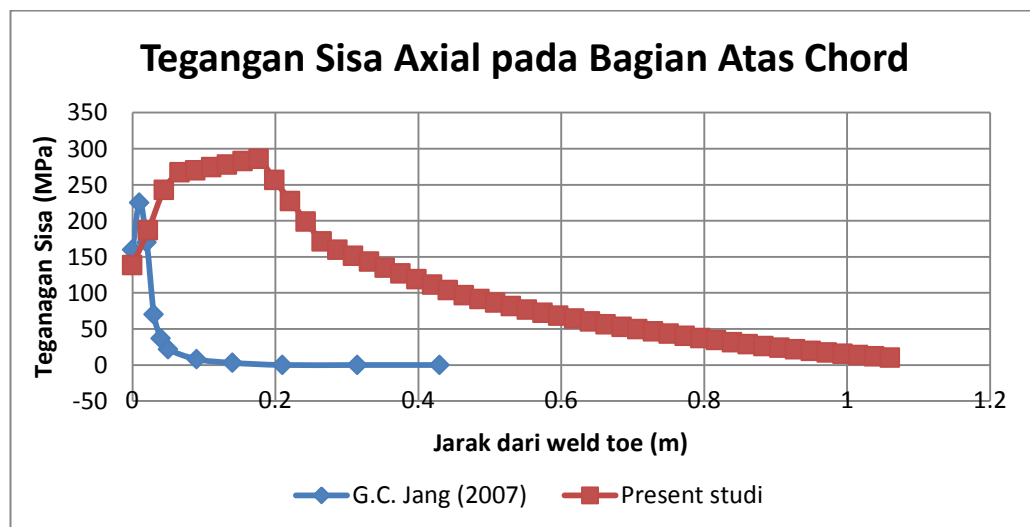
Untuk *path* 4 yang terletak pada bagian tengah *chord* tegangan aksial berupa tekan. Seperti yang terlihat pada Gambar 4-13 terlihat bahwa untuk *path* 4 tegangan sisa hampir hilang karena jauh dari daerah pengelasan. Untuk tegangan maksimumnya adalah 8,204 Mpa dan minimumnya -73,611 MPa.

4.4.1 Validasi hasil tegangan sisa

Jurnal referensi yang dipakai sebagai pembandingan dan validasi adalah jurnal internasional yang berjudul “*Characteristics of the residual stress distribution in welded tubular T-joints*” ditulis oleh G.C.Jang dkk pada tahun 2007. Pada jurnal referensi dan penelitian tugas akhir ini memiliki ukuran model dan pengelasan yang berbeda, sehingga memungkinkan nilai hasil tegangan sisa yang sangat berbeda. Dalam jurnal yang ditulis Jang dkk, distribusi tegangan sisa ditinjau pada bagian atas, tengah dan bawah *chord* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-14. Oleh karena itu penulis hanya memvalidasi kesamaan trend distribusi tegangan sisa pada bagian atas *chord* atau lebih tepatnya pada daerah *path* 3.



Gambar 4-14. Geometri model oleh dibuat Jang dkk (2007)



Gambar 4-15. Validasi distribusi tegangan sisa aksial pada bagian atas chord

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4-15 terlihat jelas bahwa trend distribusi tegangan sisa dari penelitian Jang dkk sama dengan trend distribusi tegangan sisa yang dilakukan penulis. Dalam pembacaan grafik terlihat bahwa semakin mendekati daerah *weld toe* maka tegangan sisa semakin besar begitu pula jika semakin menjauh dari *weld toe* maka tegangan sisa akan semakin bernilai rendah. Nilai tegangan sisa yang dilakukan penulis lebih besar, hal ini disebabkan karena bentuk geometri dan parameter yang penulis gunakan lebih besar daripada penelitian yang dilakukan Jang dkk.

4.5 Analisa Tegangan Sisa Setelah Perlakuan PWHT

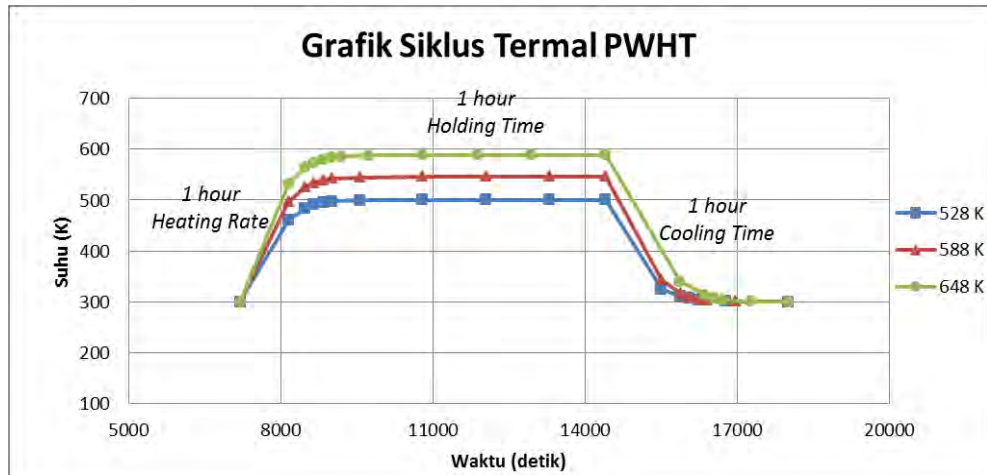
Sesuai dengan persyaratan dari ASME B.31.3 yang menjelaskan prosedur untuk *PWHT* (PWHT) pada proses *piping* untuk material karbon steel dengan ketebalan diatas 3/4" (20mm) maka pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan perlakuan PWHT pada model sambungan tubular tipe K. Penulis asumsikan bahwa perlakuan PWHT untuk *piping* sama dengan perlakuan PWHT untuk bentuk geometri tubular seperti sambungan tubular tipe K ini. Tujuannya adalah untuk dihitung nilai tegangan sisa sebelum dan sesudah perlakuan PWHT. Untuk melakukan prosedur PWHT acuan yang dipakai adalah AWS D1.1 tahun 2000. Pada AWS dikatakan bahwa untuk ketebalan 1 inci sampai 2 inci dapat digunakan *holding time* antara 1 jam hingga 2 jam dan ketika PWHT tidak dapat dilakukan dengan batasan suhu tersebut dapat dilakukan PWHT alternatif yaitu dengan suhu yang lebih rendah namun waktu tahan yang lebih lama.

Dalam tugas akhir ini dilakukan 3 varisai perlakuan PWHT yaitu seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4-5 untuk kemudian dianalisa termal dan strukturalnya.

Tabel 4-5. Variasi suhu untuk simulasi PWHT

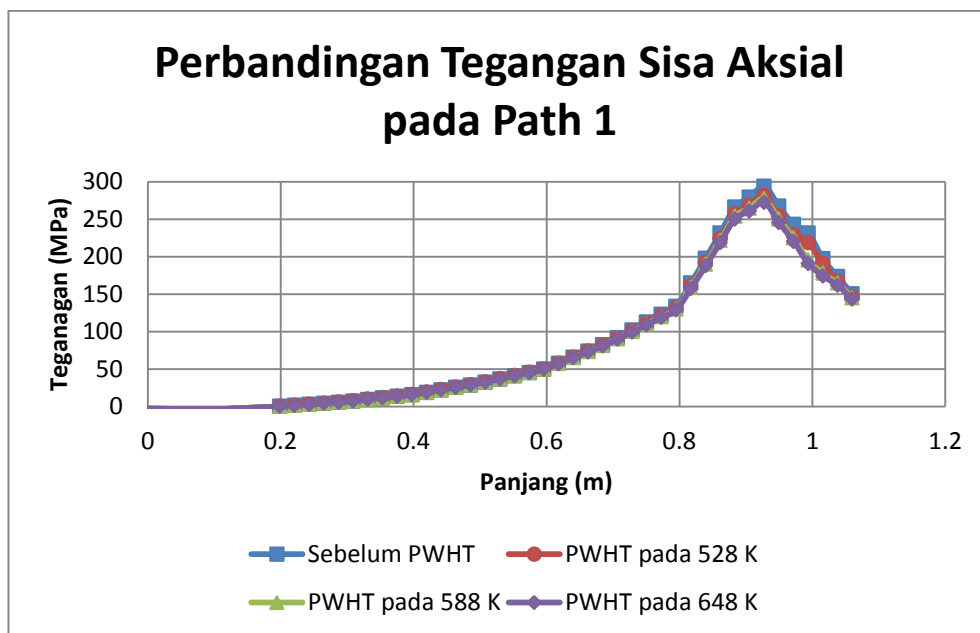
| No. | Suhu (⁰ C) | Suhu (K) | Waktu tahan (jam) |
|-----|------------------------|----------|--------------------|
| 1. | 255 | 528 | 1 |
| 2. | 315 | 588 | 1 |
| 3. | 375 | 648 | 1 |

Hasil dari analisa termal adalah distribusi temperatur. Untuk PWHT distribusi temperatur ditampilkan dalam garfik siklus termal. Siklus termal tersebut adalah *heating rate*, *holding time* dan *cooling time*. Gambar 4-16 berikut adalah grafik siklus termal proses PWHT untuk masing-masing variasi suhu *heating rate* dan *holding time*.



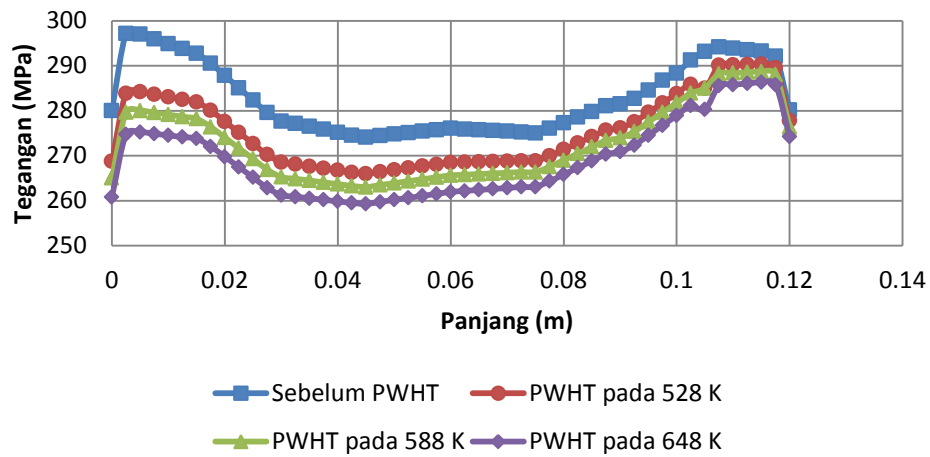
Gambar 4-16. Grafik siklus termal proses PWHT

Setelah dilakukan analisa termal selanjutnya adalah dilakukan analisa tegangan sisa. Tujuan dari perlakuan PWHT ini adalah mengurangi tegangan sisa yang terjadi. Sesuai dengan peninjauan tegangan sisa sebelum PWHT, maka hasil distribusi tegangan sisa setelah perlakuan PWHT ini juga ditinjau menjadi 4 *path line*. Pada Gambar 4-17 menunjukkan grafik perbandingan tegangan sisa setelah pengelasan dan setelah proses PWHT untuk semua tinjauan *path*.



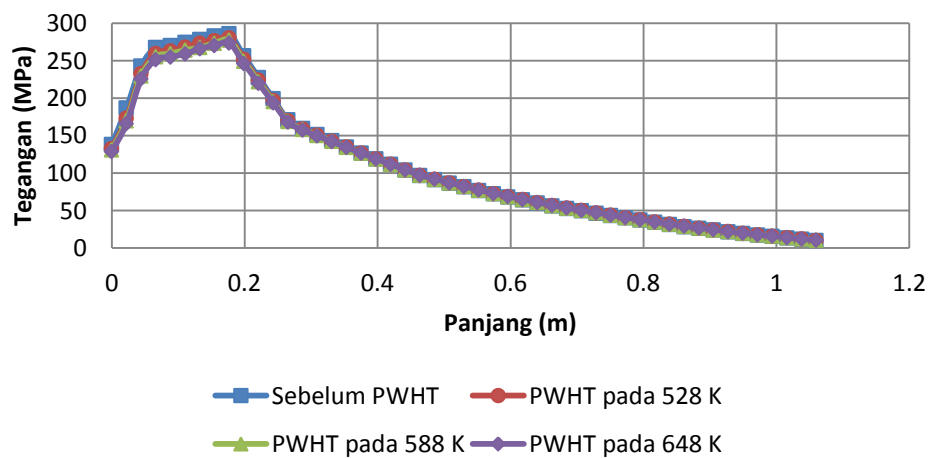
(a)

Perbandingan Tegangan Sisa Aksial pada Path 2

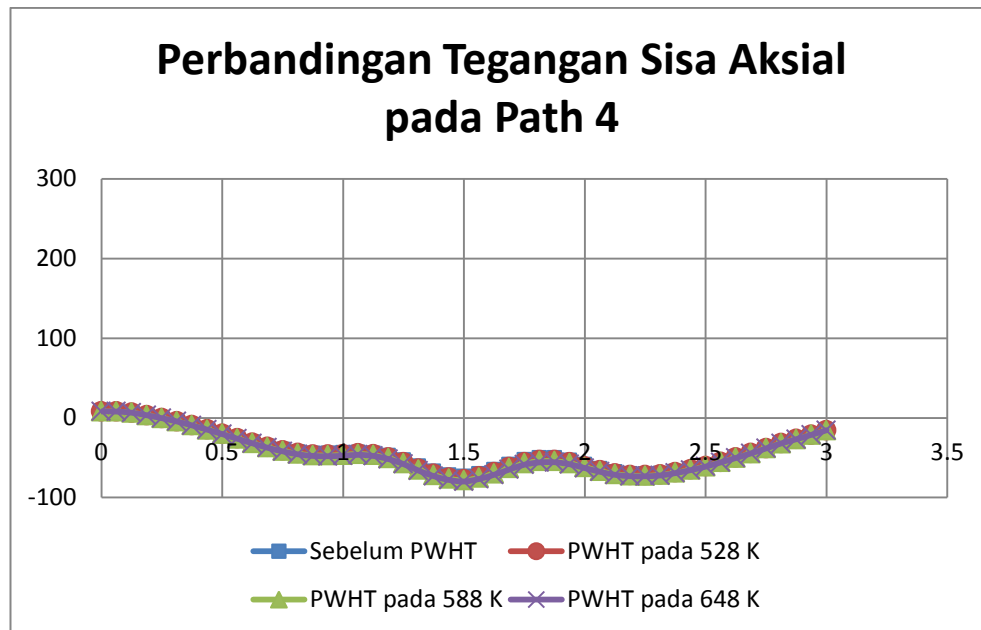


(b)

Perbandingan Tegangan Sisa Aksial pada Path 3



(c)



(d)

Gambar 4-17. Grafik perbandingan tegangan sisa pada (a) *path1*, (b) *path*, (c) *path3* dan (d) *path4*

Pada garfik terlihat bahwa *trend line* distribusi tegangan sisa sesudah PWHT untuk suhu 528 K, 588 K maupun 648 K memiliki persamaan dengan trend distribusi tegangan sisa sebelum PWHT untuk semua *pathline*. Perbandingan tegangan sisa aksial yang paling terlihat signifikan ada pada *path2*. Sedangkan untuk *path 1*, *path 3* dan *path 4* perubahan tegangan sisa tidak terlalu signifikan bahkan dalam Gambar 4-17 (a), (c) dan (d) grafik distribusi tegangan sisa nampak bertumpuk. Untuk pengurangan tegangan sisa yang terjadi dapat dilihat pada Tabel 4-6 berikut.

Tabel 4.6 Pengurangan tegangan sisa setelah PWHT

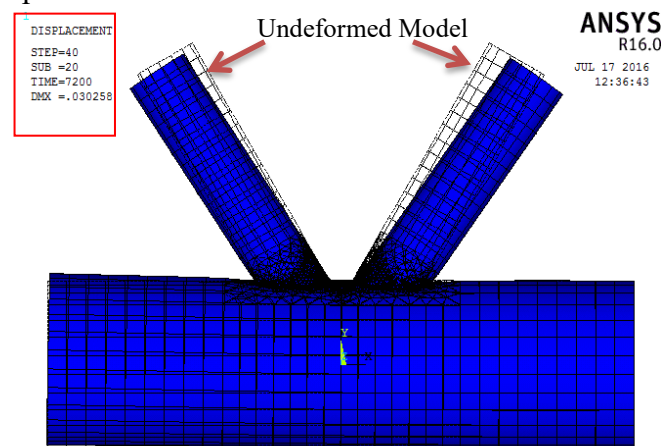
| Kondisi | <i>Path 1</i> | <i>Path 2</i> | <i>Path 3</i> | <i>Path 4</i> |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Setelah Pengelasan | 293,82 MPa | 297,148 MPa | 285,99 MPa | 8,024 MPa |
| Setelah PWHT 528 K | 281,37 MPa | 290,31 MPa | 280,3 MPa | 8,0781 MPa |
| Setelah PWHT 588 K | 277,3 MPa | 288,73 MPa | 277,3 MPa | 8,0998 MPa |
| Setelah PWHT 648 K | 272,43 MPa | 286,33 MPa | 273,46 MPa | 8,1227 MPa |

Seperti yang dapat dibaca pada Tabel 4.6 diatas bahwa akibat perlakuan PWHT tegangan sisa dapat berkurang hingga sebesar 21,39 Mpa untuk *path 1*, untuk *path 2* sebesar 11,49 Mpa, untuk *path 3* sebesar 12,53

Mpa ketika suhu PWHT terbesar yaitu 648 K. Nilai tersebut ditinjau dari nilai tegangan sisa sebelum perlakuan PWHT untuk masing-masing *path* dengan suhu PWHT 648 K. Sedangkan untuk *path* 4 tidak terjadi pengurangan tegangan sisa namun terjadi penambahan nilai tegangan sisa, hal ini berarti bahwa terjadi perubahan gaya tekan menjadi tarik pada daerah *path* 4.

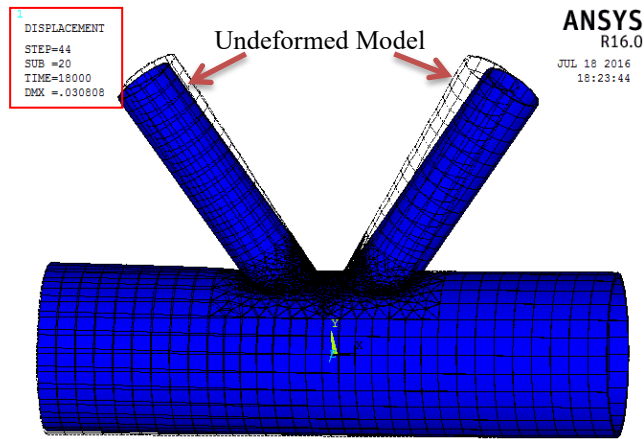
4.6 Analisa Total Deformasi

Berdasarkan hasil analisa struktural didapat bahwa deformasi total yang terjadi pada model sambungan tubular tipe K ini sebesar 0,03 m atau 3 cm dan terdapat pada ujung *brace* sebelah kanan yang dekat dengan *chord* bertumpuan bebas. Sedangkan pada ujung *chord* yang bertumpuan jepit tidak terjadi deformasi. Total deformasi pada model sambungan tubular tipe K ditunjukkan pada Gambar 4-18 berikut.

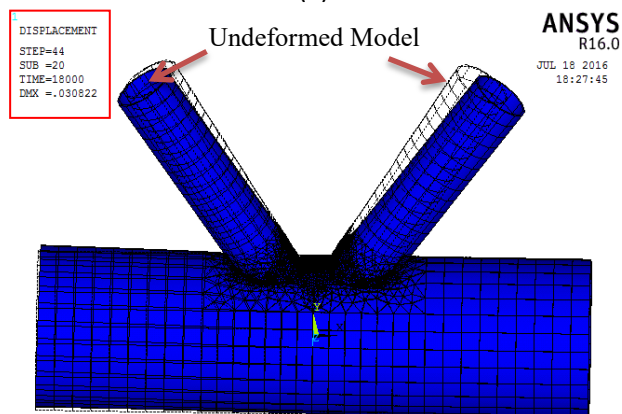


Gambar 4-18. Total deformasi sebelum PWHT

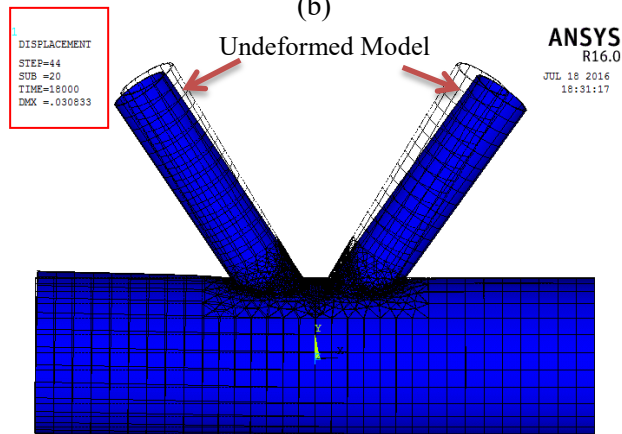
Sedangkan pengaruh perlakuan PWHT terhadap nilai deformasi yang terjadi tidak terlalu signifikan bahkan tetap. Sehingga perlakuan PWHT pada sambungan tubular tipe K ini tidak memiliki pengaruh terhadap deformasi yang terjadi. Berikut akan ditampilkan perubahan deformasi pada sambungan tubular tipe K setelah perlakuan PWHT pada suhu 538 K, 588 K, dan 648 K seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-19 berikut:



(a)



(b)



(c)

Gambar 4-19. Total Deformasi setelah perlakuan PWHT pada suhu (a) 538 K, (b) 588 K, dan (c) 648 K

Hasil pembacaan besar total deformasi untuk Gambar 4-19 akan ditampilkan pada Tabel 4-7 berikut:

Tabel 4-7. Total deformasi

| Kondisi | Total Deformasi (m) |
|--------------------|---------------------|
| Setelah Pengelasan | 0,030258 |
| Setelah PWHT 528 K | 0,030808 |
| Setelah PWHT 588 K | 0,030822 |
| Setelah PWHT 648 K | 0,030833 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

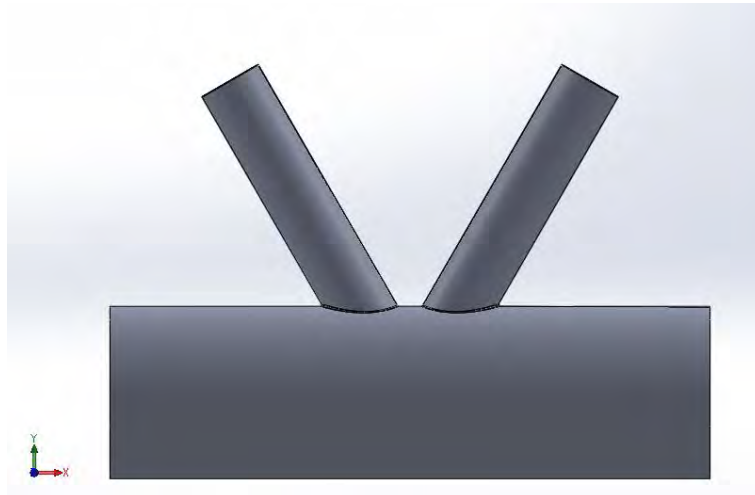
LAMPIRAN A

Langkah-langkah Pengerjaan Analisa Termal dengan *Software* ANSYS APDL

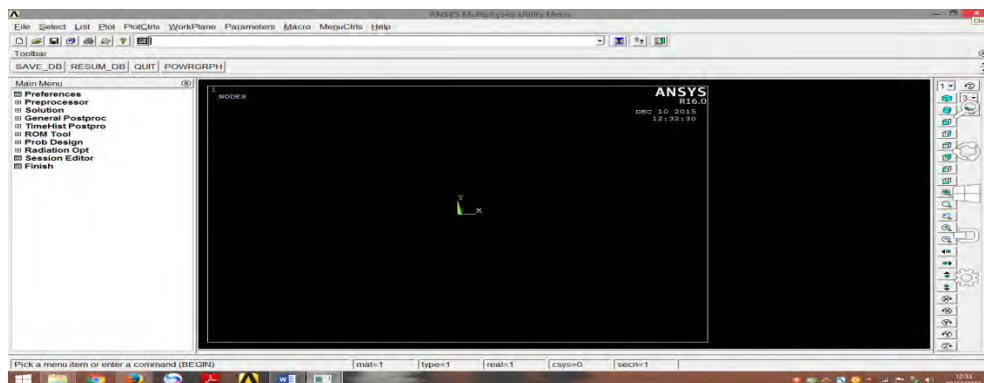
LAMPIRAN A

Langkah-langkah Pengerjaan Analisa Termal

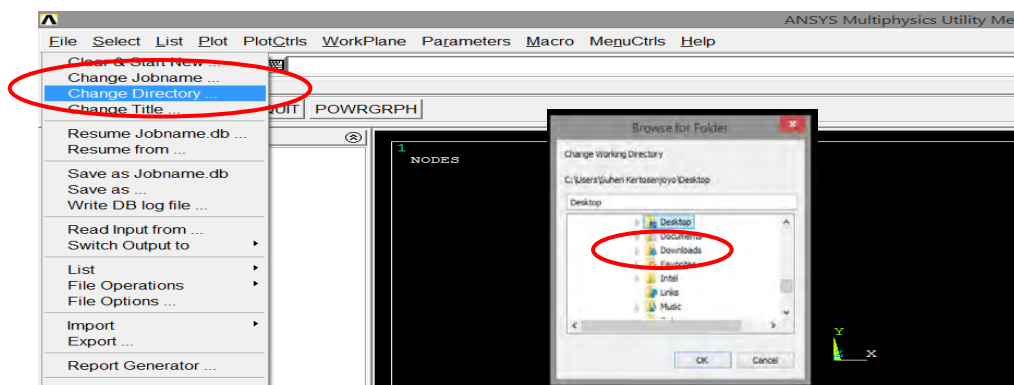
Membuat geometri sambungan tubular tipe K menggunakan *software SolidWork* seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



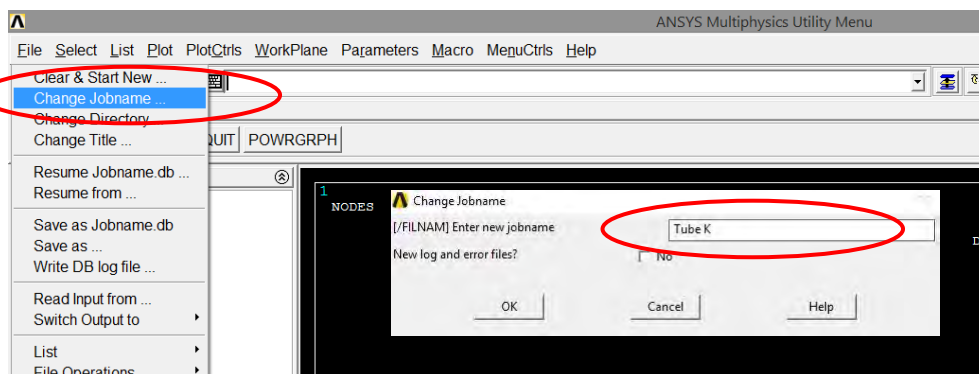
Proses input data geometri dan meshing
Buka program ANSYS APDL 16.0 mechanical



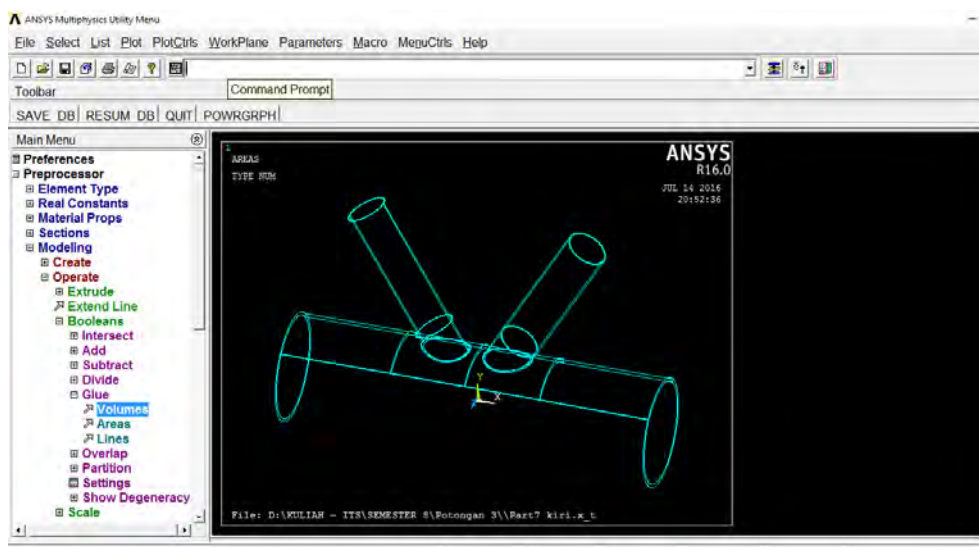
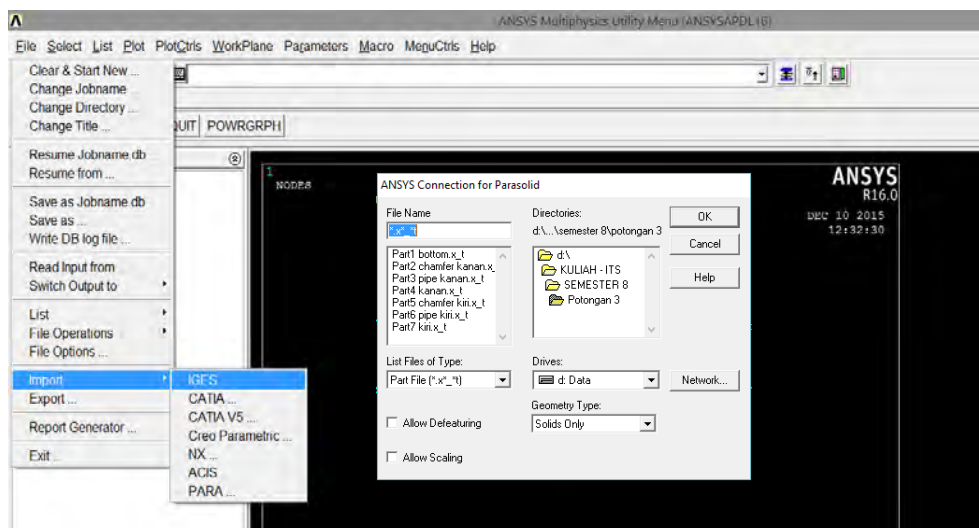
Buka file → pilih **Change Directory** (untuk tempat penyimpanan)



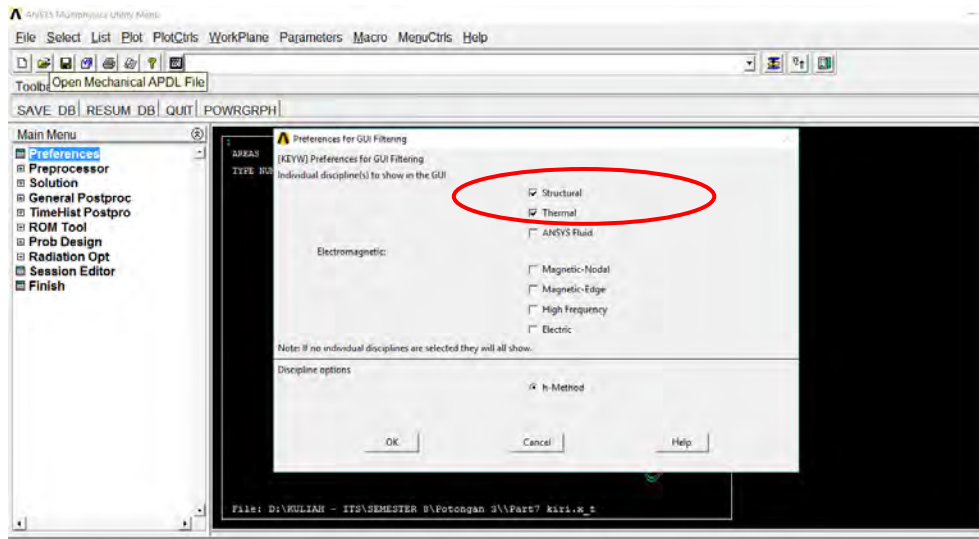
Buka File → pilih **Change Jobname** (tuliskan nama Project)



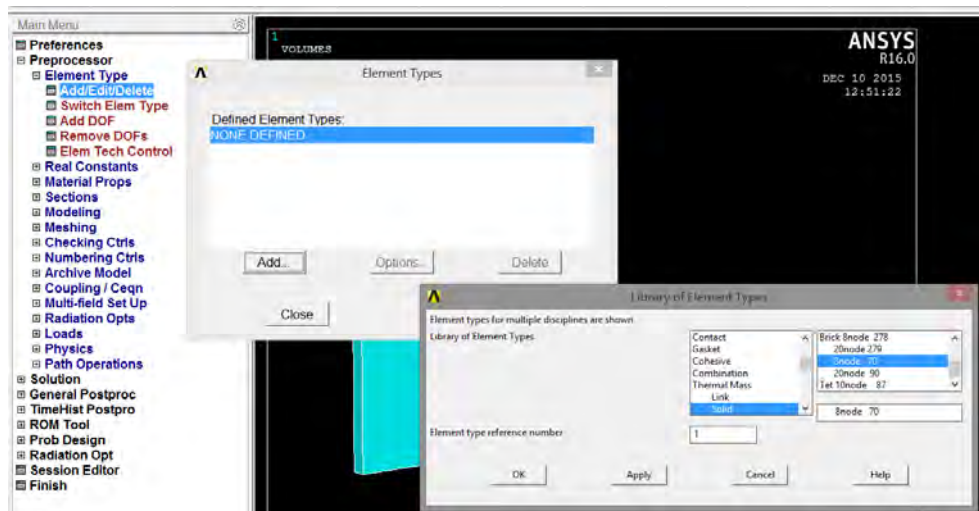
Buka File → Import → PARA (browse file Parasolid)

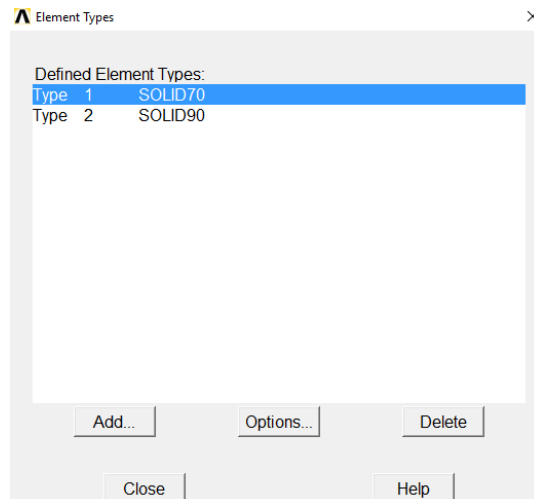


Main menu → Pilih Preferences → check Structural dan thermal



Main menu → Preprocessor → Element Type → pilih Add/Edit/Delete → klik Add → pilih Thermal Mass > Solid > 8 node 70 → OK (pastikan elemen terdaftar pada tabel) Lakukan langkah yang sama dengan memilih 20 node 90



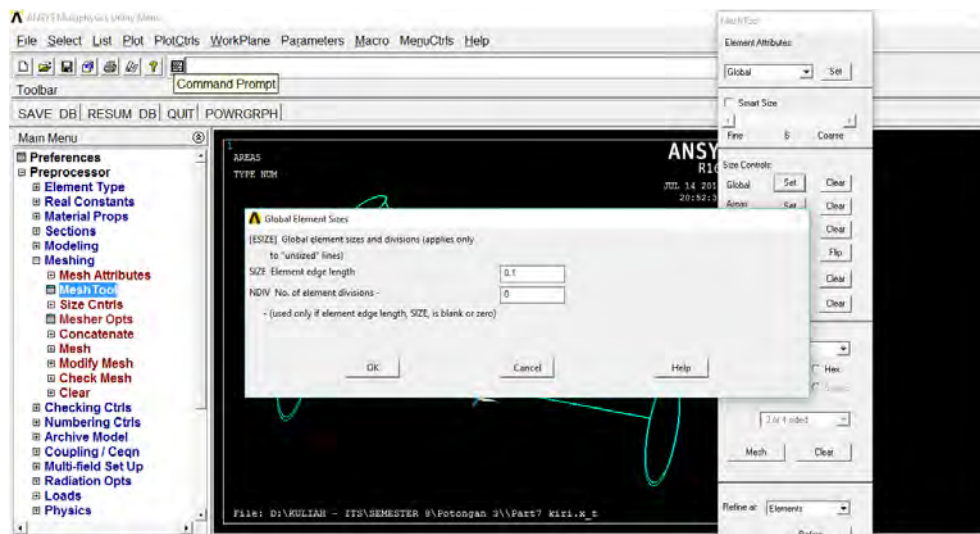


Meshing

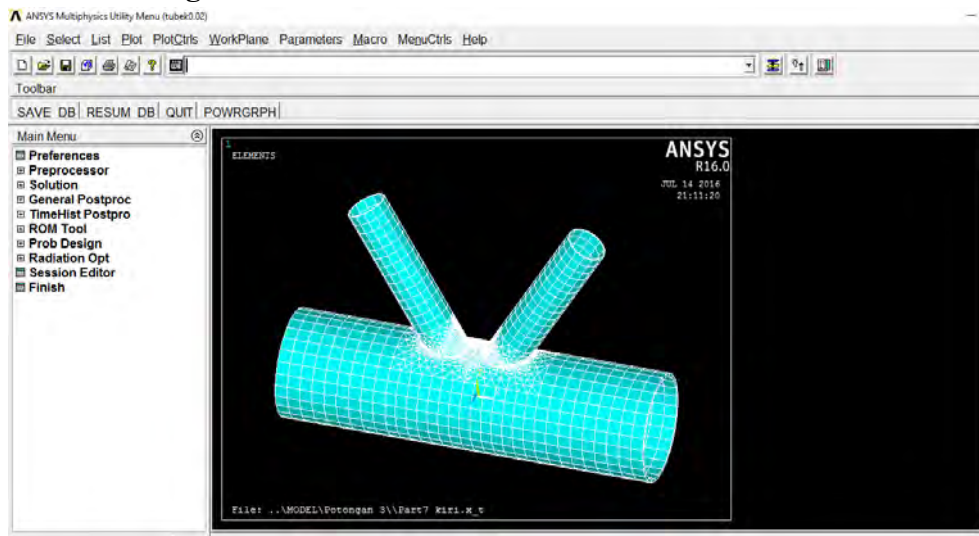
Pilih Mesh Tool → set global meshing volume (untuk meshing global)

→ OK → Mesh

Lakukan hal serupa namun kali ini pilih untuk volume daerah pengelasan
pilih nomor meshing yang lebih halus dan ganti elemen dengan tipe tetrahedral

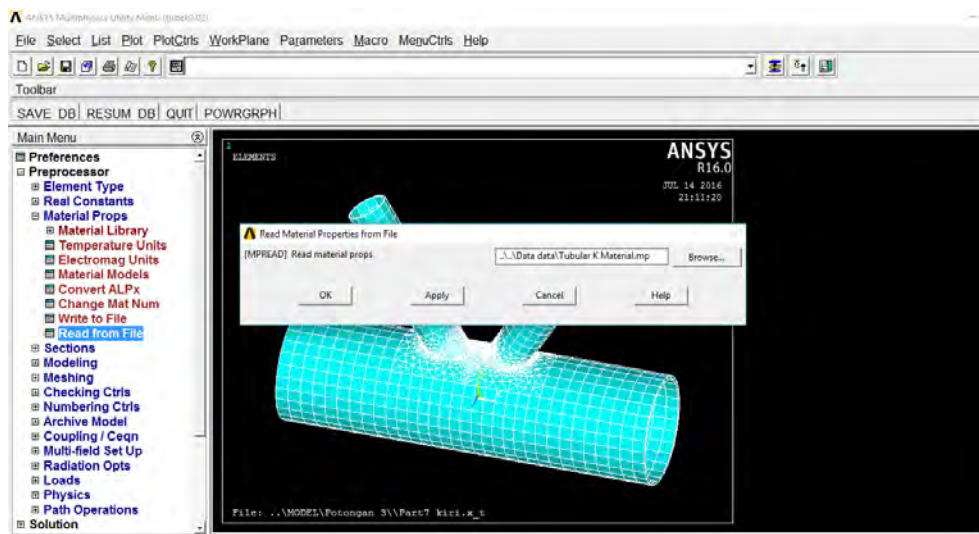


Hasil meshing

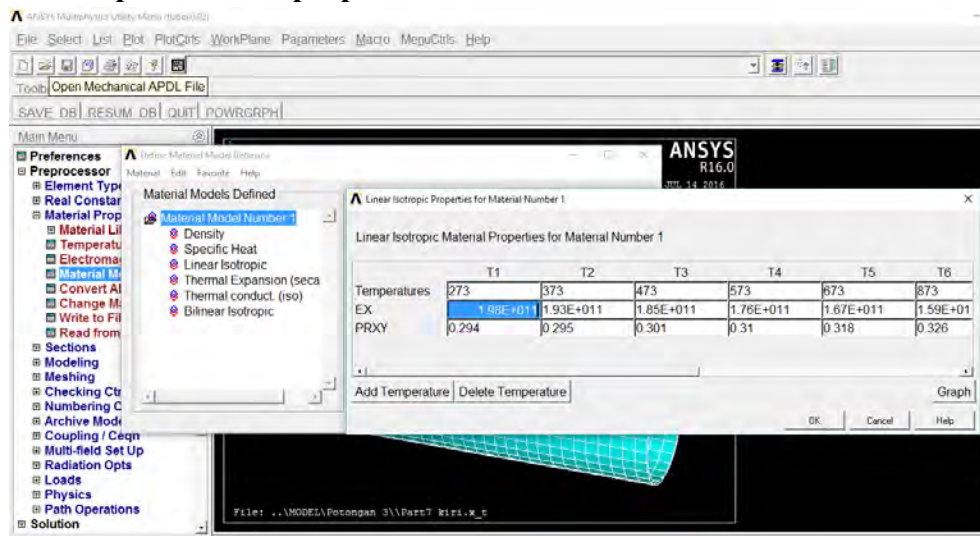


Proses input data properti material baja.

Main menu → Preprocessor → Material Prop → pilih Read from file → klik browse (cari data material propertis) → (untuk melihat data material pilih Material models > klik material model number)

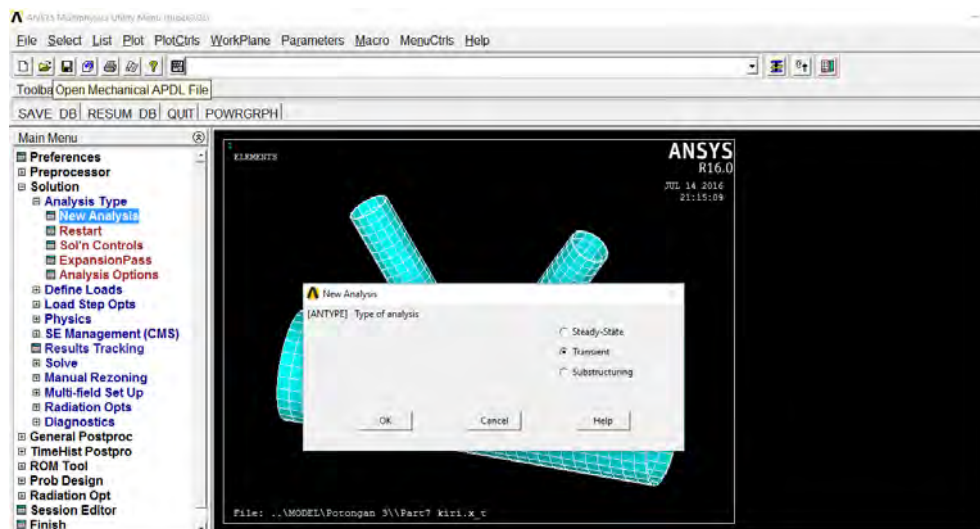


Hasil input material properties

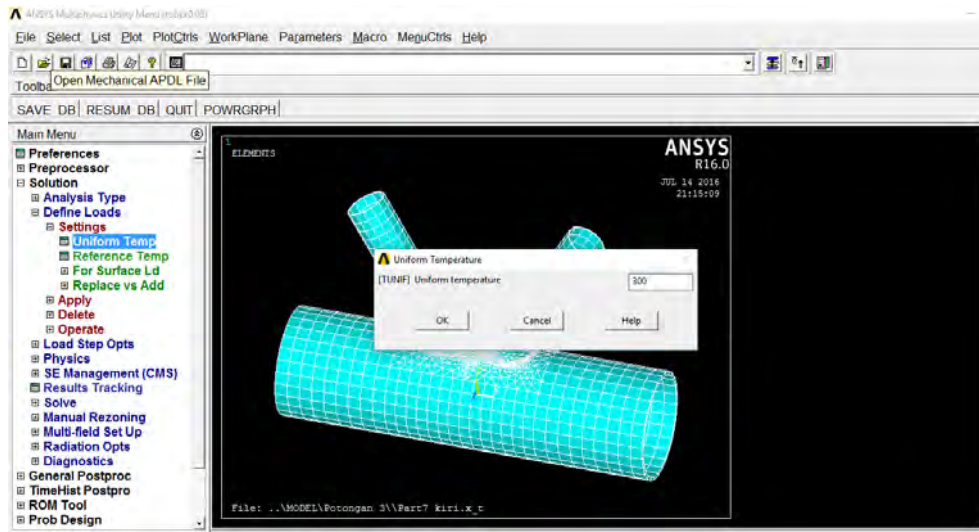


Proses pembebanan thermal secara transient.

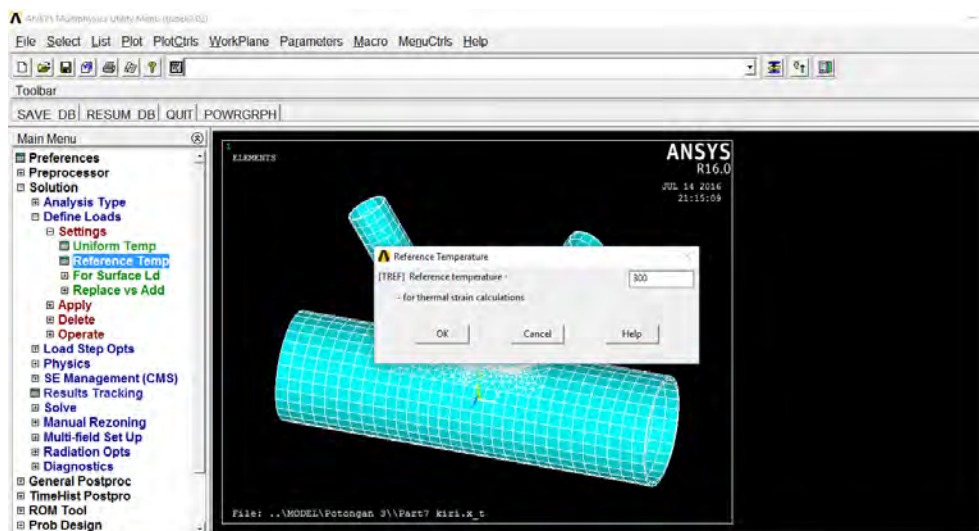
Main menu → Solution → Analysis Type → pilih New Analysis → pilih Transient → OK → pilih Full → OK



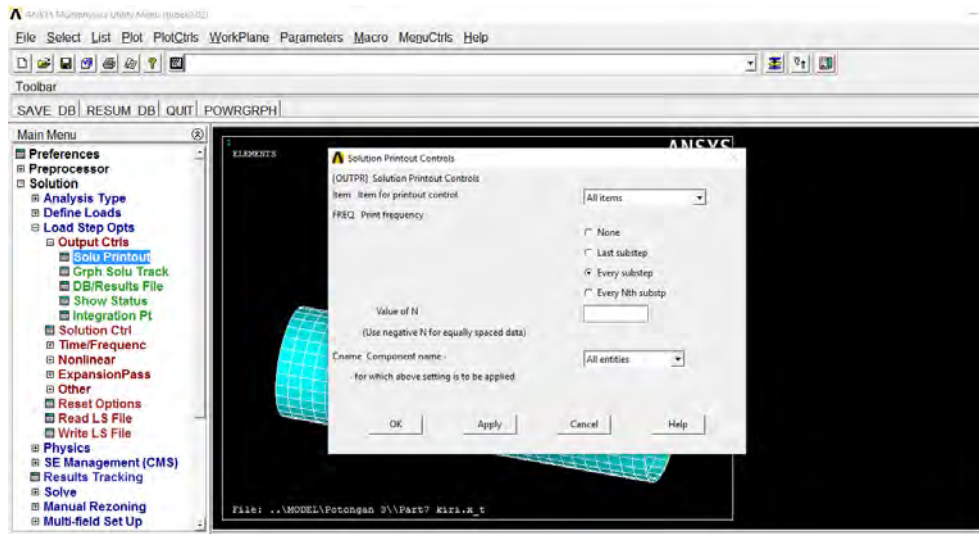
Main menu → Solution → Define Loads → Settings → pilih Uniform Temp (masukkan temperatur) → OK



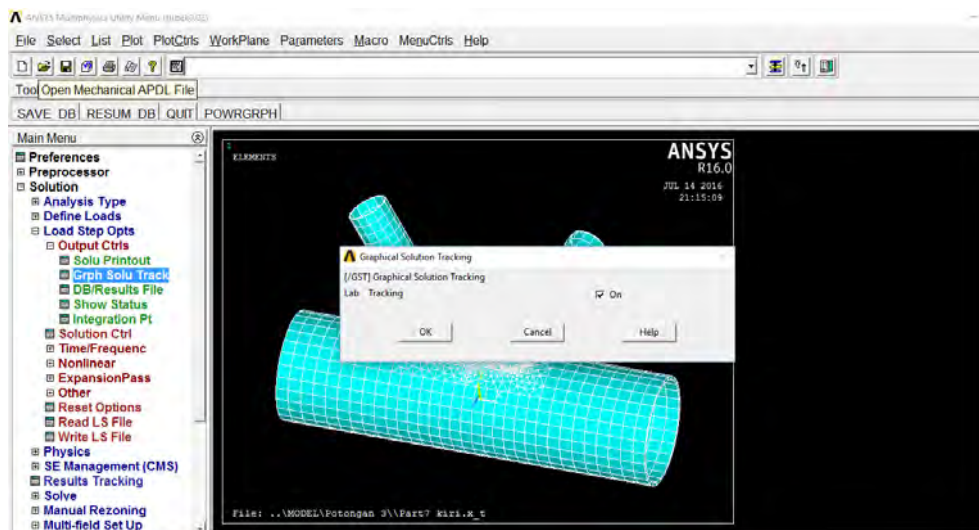
Main menu → Solution → Define Loads → Settings → pilih Reference Temp (masukkan reference temperatur) → OK



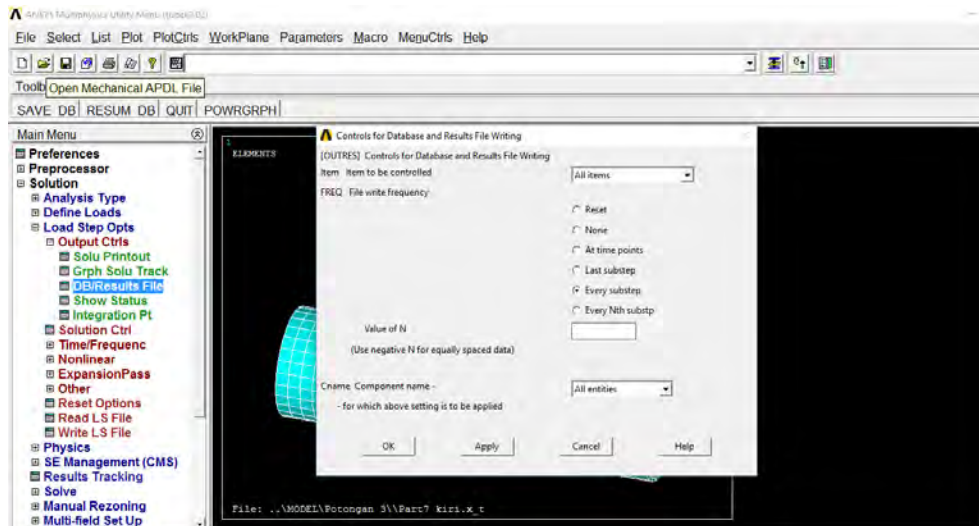
Main menu → Solution → Load Step Opts → pilih Output Ctrl → pilih Solu Print Out → kemudian pilih berikut :



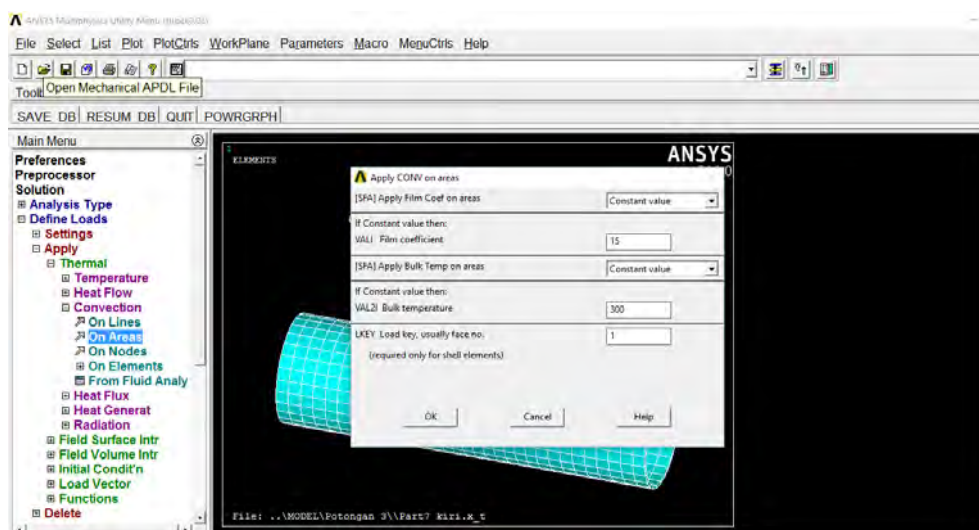
Main menu → Solution → Load Step Opts → pilih Output Ctrls → Grph Solu Track → Check pada posisi “ON” → OK

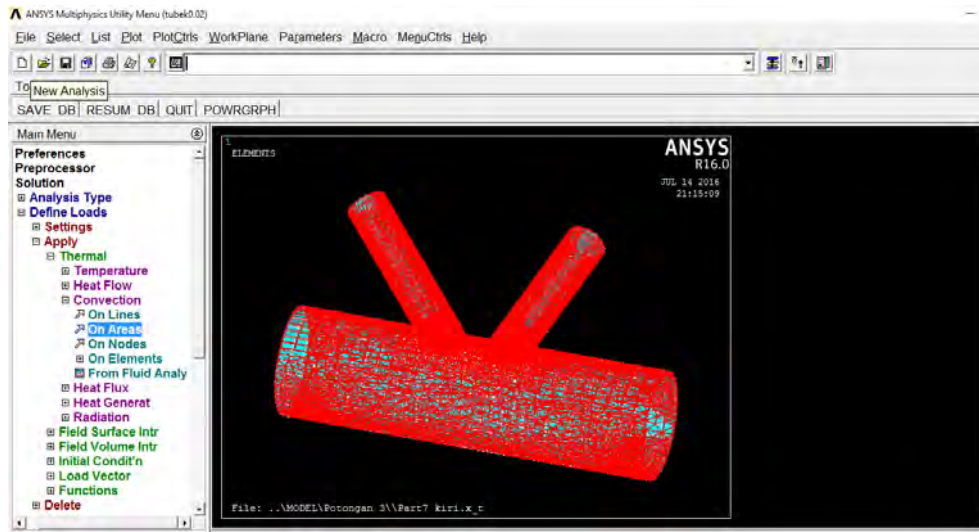


Main menu → Solution → Load Step Opts → pilih Output Ctrls → pilih DB/Results File → pilih pada tabel berikut :

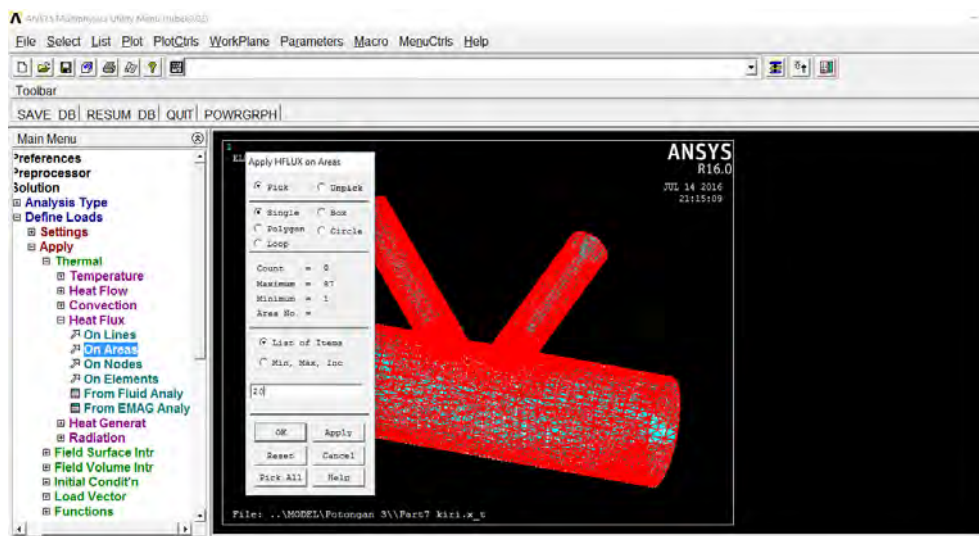


Main menu → Solution → Define Loads → Apply → Thermal → Convection → pilih On Area → Pick All → isi nilai tabel berikut :

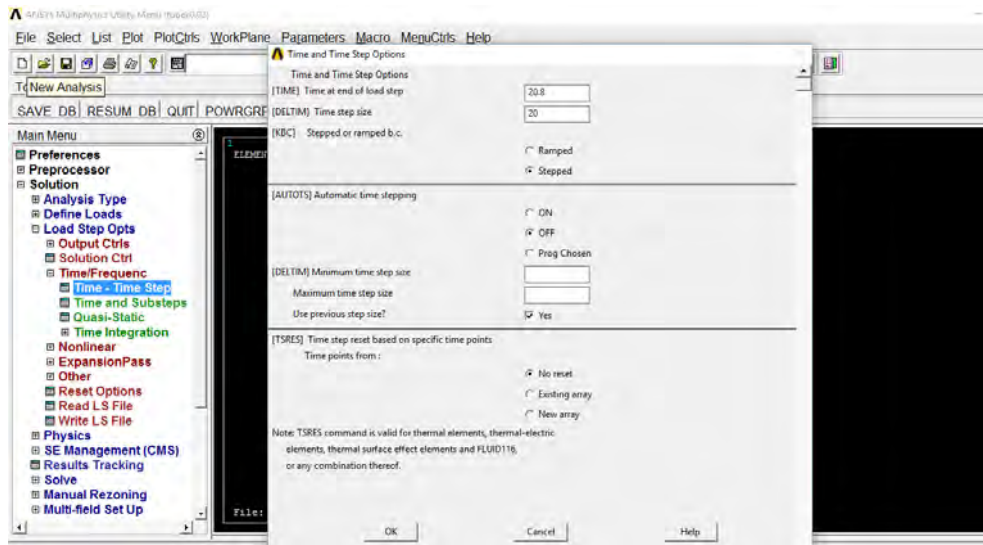




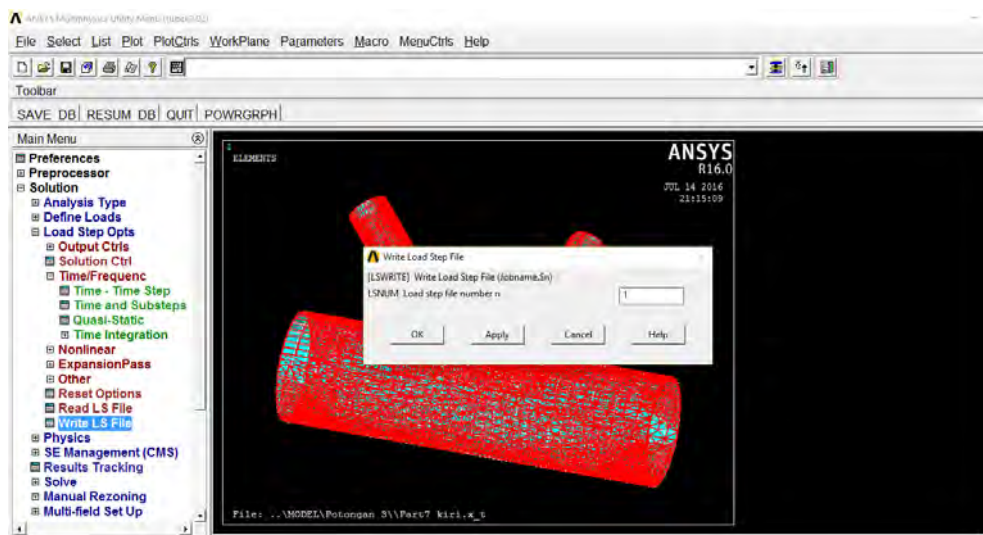
Main menu → Solution → Define Loads → Apply → Heat Flux → pilih On Area (pilih Area Weld Bead) → OK



Main menu → Solution → Load Step Opts → Time/ Frequency → pilih Time and Substeps → (lengkapi kolom seperti berikut

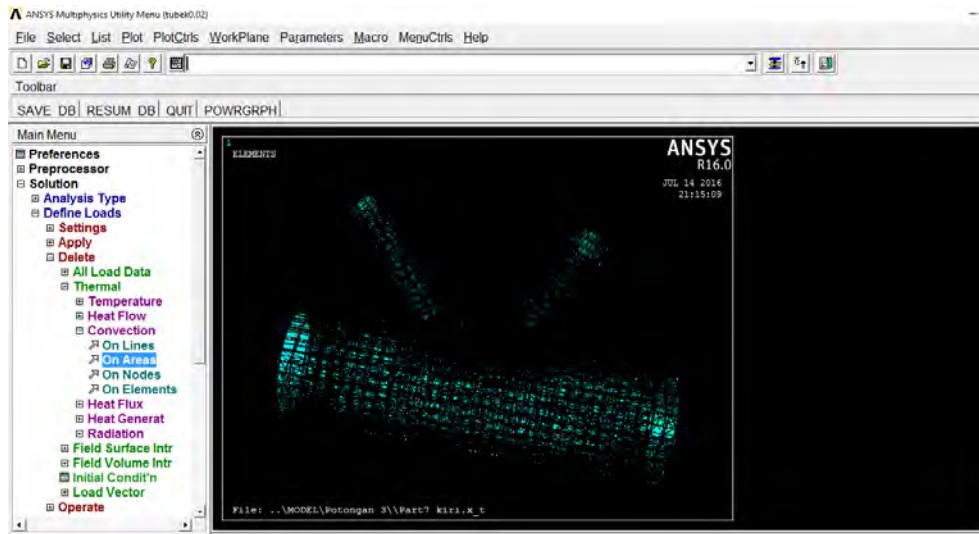


Main menu → Solution → Load Step Opts → Pilih Write LS File (Sesuai dengan Nomor urut Loadstep)



Main menu → Solution → Define Loads → Delete → Thermal → Convection

Main menu → Solution → Define Loads → Delete → Thermal → Heat Flux



Lakukan Step 15 hingga 19 untuk tiap Load Step (weld area) selanjutnya. Untuk memudahkan kita dapat mencopyy progres tersebut dari session editor dan menulis ulang pada notepad seperti ditunjukan gambar berikut:

```

INPUT HF-CONVECT - Notepad
File Edit Format View Help

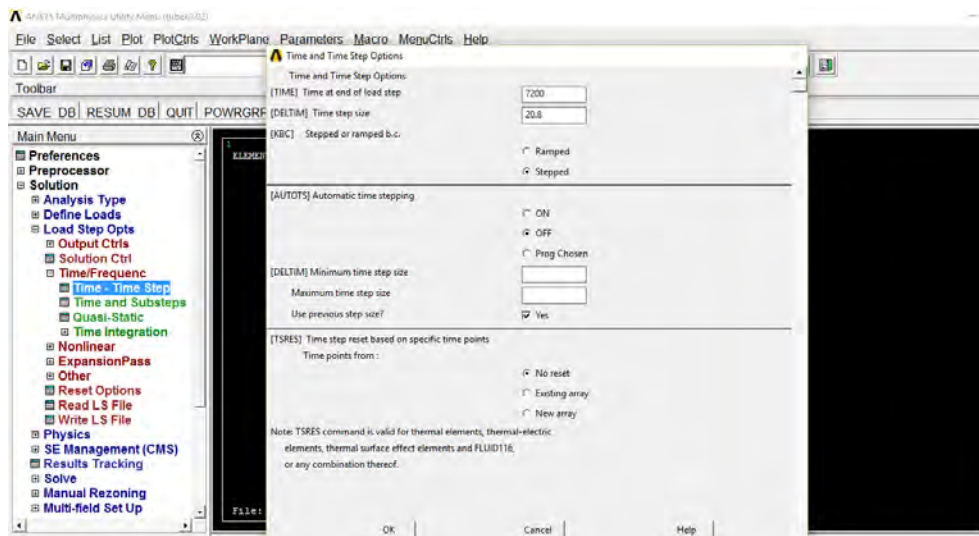
!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,45809747
!*
TIME,20.8
AUTOTS,0
NSUBST,2,,1|
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,1,

!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV
!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

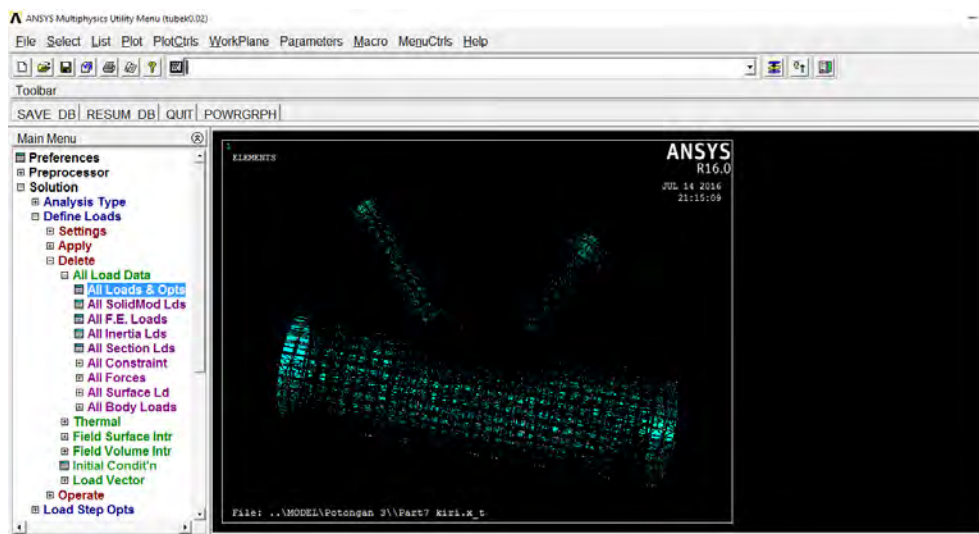
!!! LOADSTEP 2
!!! CONVECTION
FLST,2,87,5,ORDE,14

```

Untuk Load Step pendinginan (Load Step terakhir) tabel Time/Frequenc diisi seperti berikut:

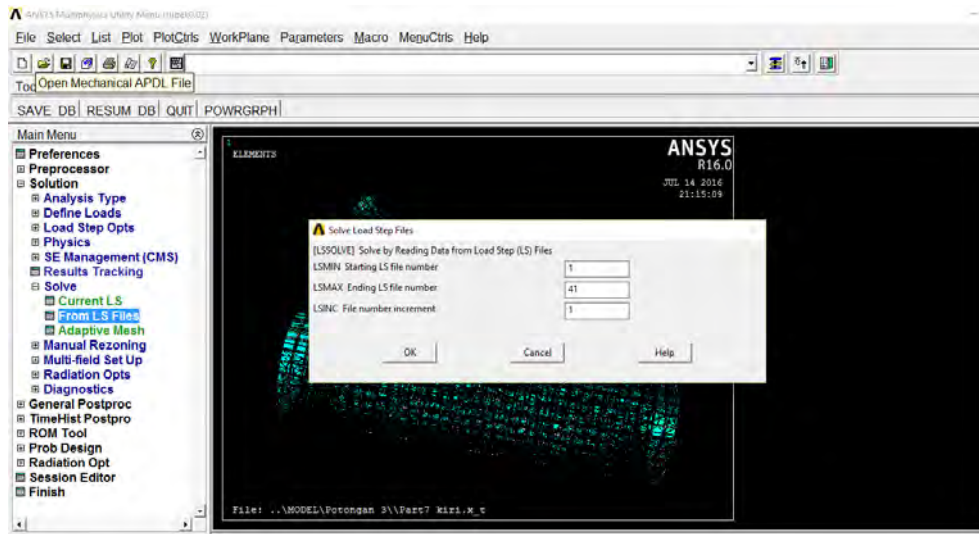


Main menu → Solution → Define Loads → Delete → All Loads & Data
→ pilih All Loads & Opts



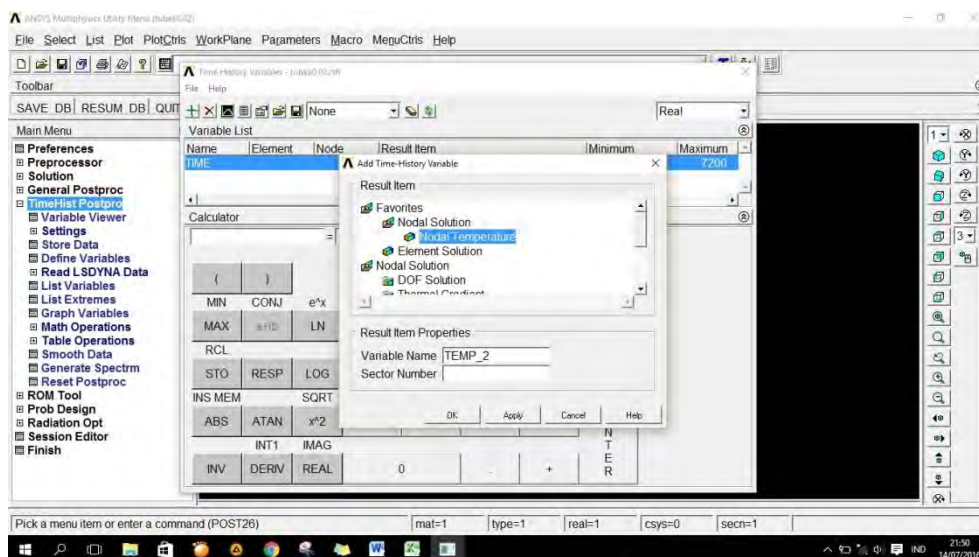
Solve

Main menu → Solution → Solve → pilih From LS Write

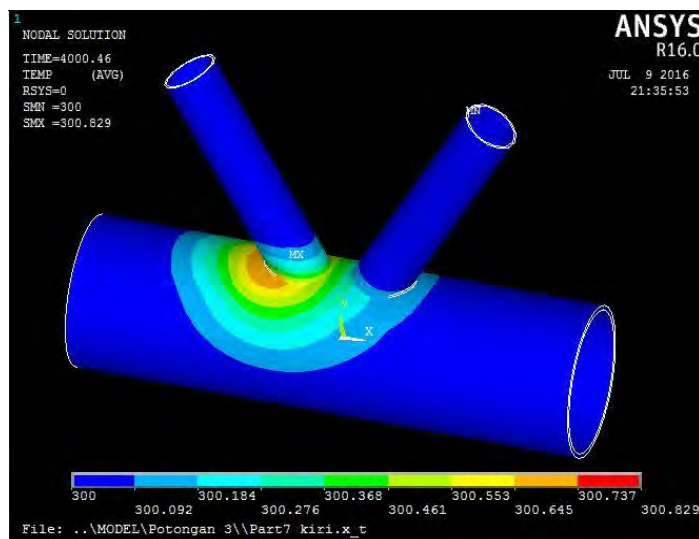
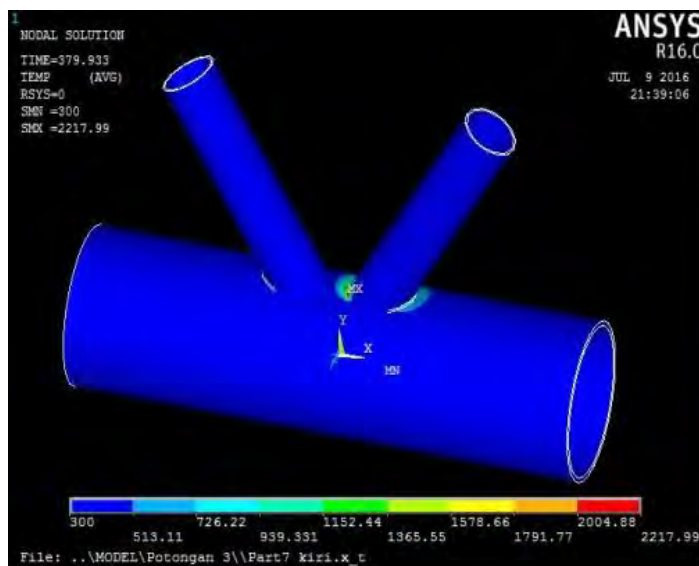
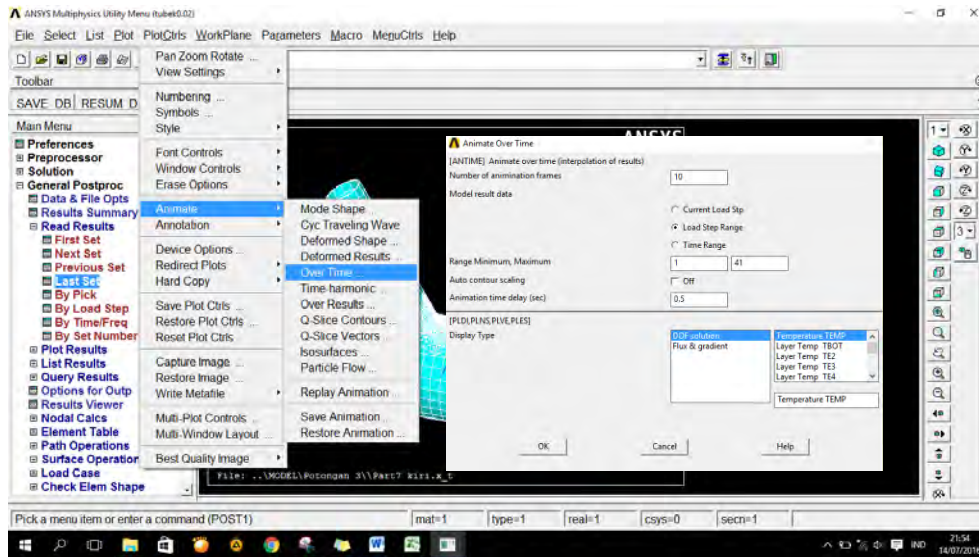


Tunggu sampai hasil runningnya selesai

Main menu → TimeHist Postpro → Maka akan keluar kotak dialog kemudian pilih seperti gambar berikut : (untuk melihat bagaimana grafik distribusi temperatur di tiap node terpilih)



Main menu → General Postproc → pilih Read Results → Last Set → Buka PlotCtrls → Animate → Over Time (pengaturan waktu disesuaikan dengan pendinginan) → OK



LAMPIRAN B

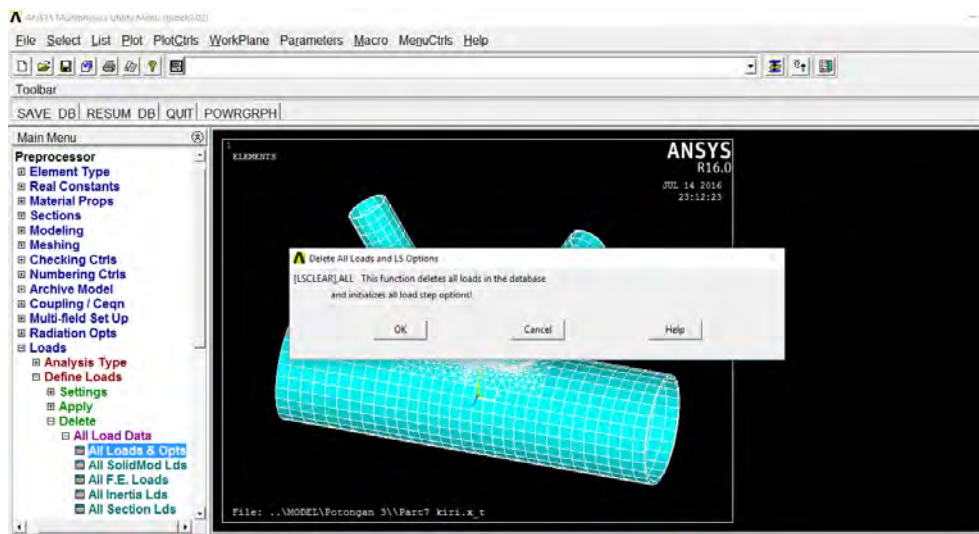
Langkah-langkah Pengerjaan Analisa Struktural dengan *Software* ANSYS APDL

LAMPIRAN B

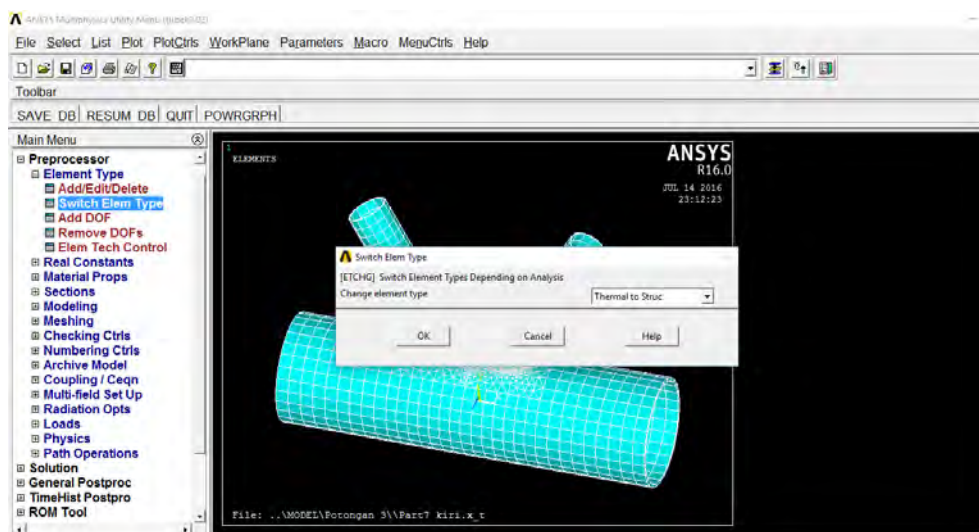
Langkah-langkah Pengerjaan Analisa Struktural

Proses ini mengubah regangan thermal menjadi regangan struktural yang mengakibatkan timbulnya tegangan sisa (jenis file rth ke file rst). Dari analisa termal yang telah dilakukan sebelumnya kemudian dilanjutkan langkah-langkah seperti berikut :

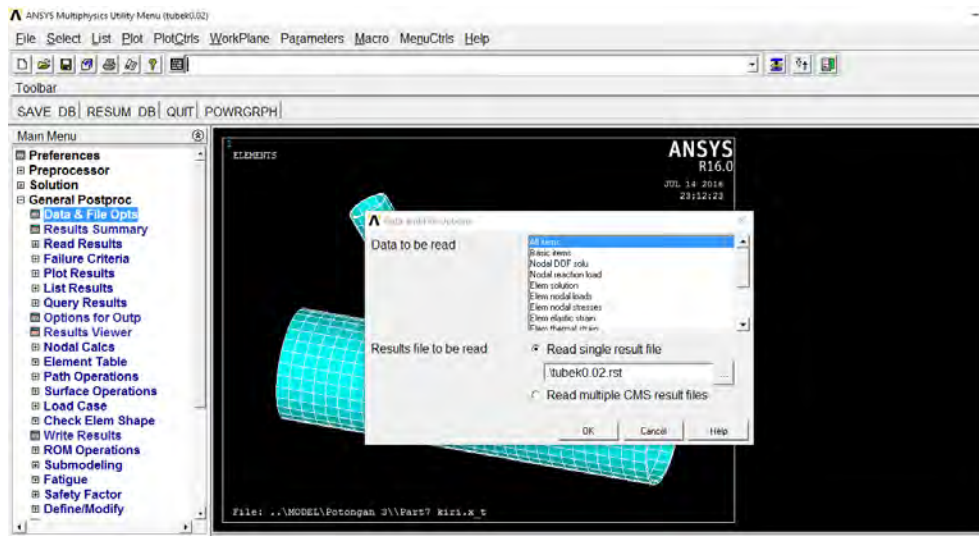
Main menu → pilih Preprocessor → Loads → Define Loads → Delete → All Load data → pilih All Loads & opts → OK (pastikan semua data Load telah dihapus)



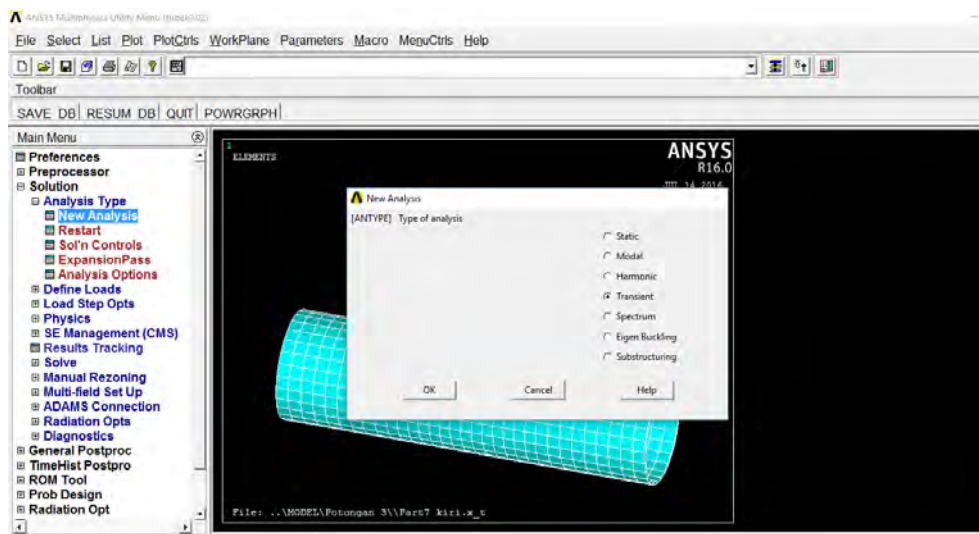
Main menu → pilih Preprocessor → Elemen Type → Switch Elem Type → pilih Thermal to Struc → OK



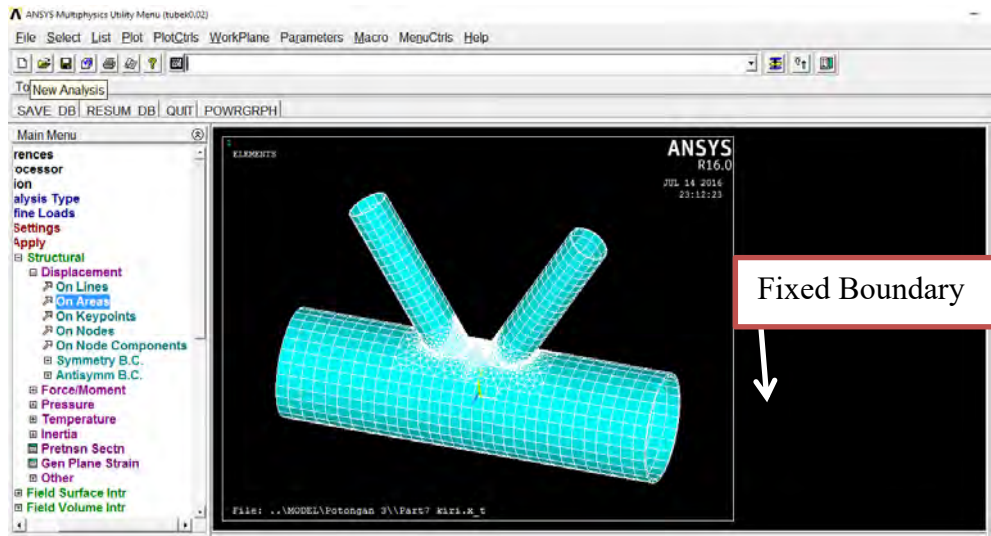
Main menu → pilih General Postproc → Data & File Ops → Browse → file rth → open → OK



Main menu → pilih Solution → Analysis Type → New Analysis → pilih Transient → OK

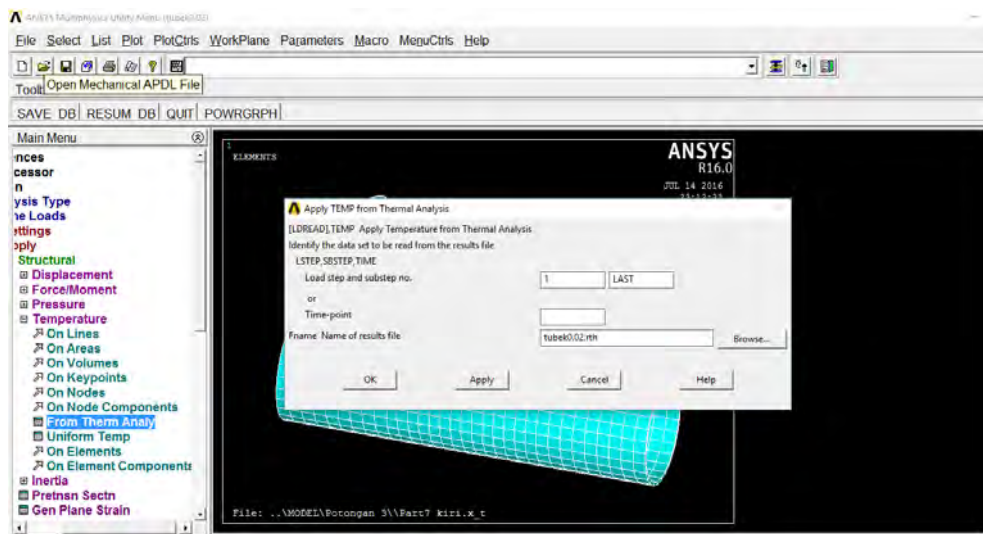


Main menu → Pilih Solution → Define Load → Apply → Structural → Displacement → On Area (pilih Boundary condition terhadap sumbu UX, UY dan UZ = 0)

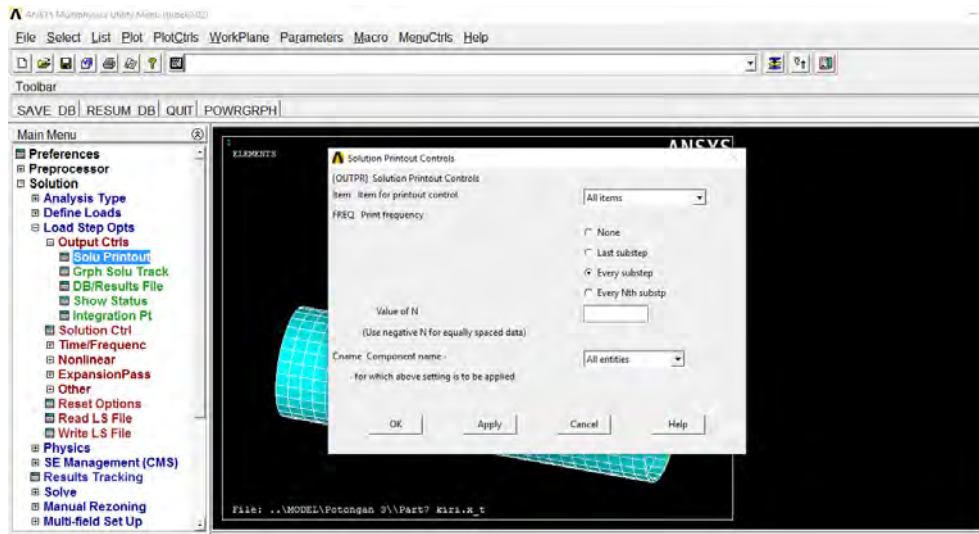


Main menu → Pilih Solution → Define Load → Apply → Structural → Temperature → pilih Form Therm Analy → masukkan data berikut:

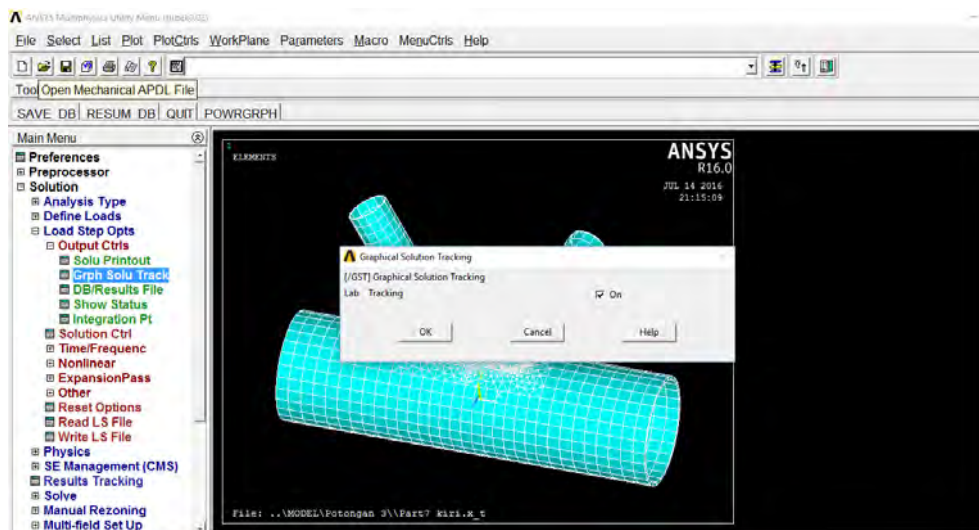
- Isi kolom dengan nomor urut loadstep
- tuliskan "LAST"
- kemudian "browse file rth"
- Klik OK



Main menu → Solution → Load Step Opts → pilih Output Ctrls → pilih Solu Print Out → kemudian pilih berikut:



Main menu → Solution → Load Step Opts → pilih Output Ctrls → Grph Solu Track → Check pada posisi “ON” → OK



Main menu → Pilih Solution → Loadstep Opts → Time/Frequec → pilih Time and Substeps

Isi kolom “TIME” dengan jumlah waktu yang dibutuhkan untuk satu Loadstep ke Loadstep berikutnya (waktu dapat disesuaikan dengan jarak antar Loadstep)

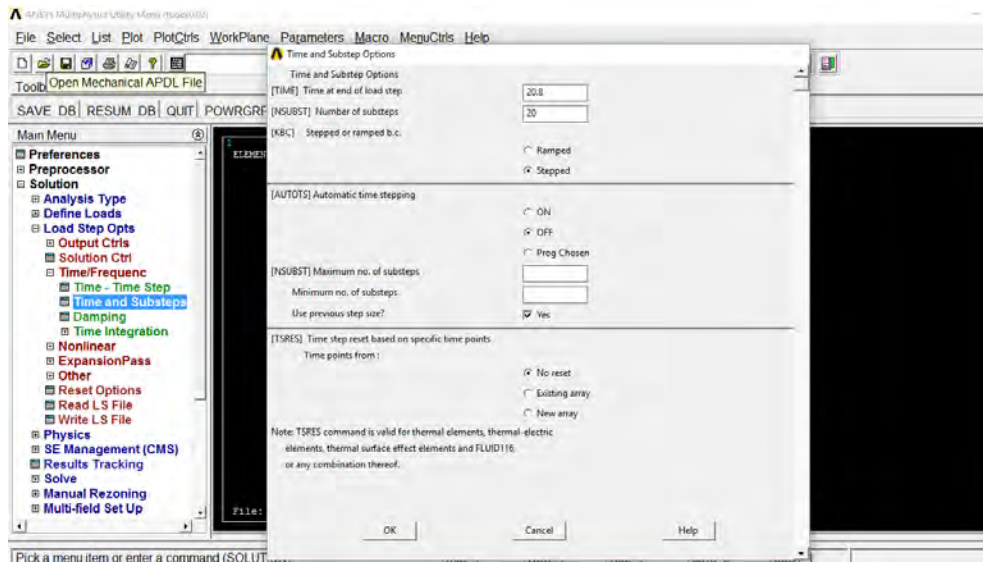
Isi kolom “NSUBST (Number of substep)”

Check “Stepped”

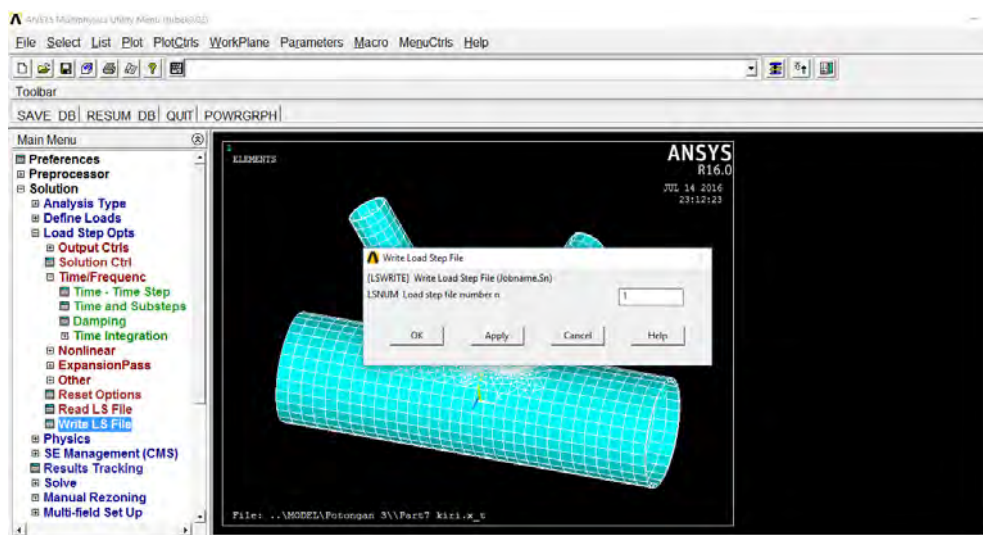
Check “AUTOTS” pada kondisi “OFF”

Pastikan “TSRES” dalam kondisi “No reset”

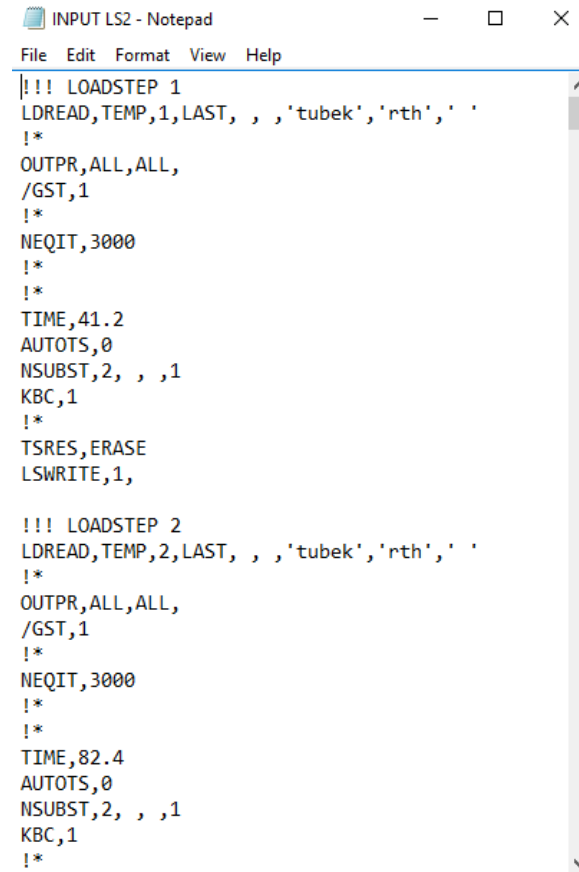
Klik Ok



Main menu → Solution → Load Step Opts → Pilih Write LS File (Sesuai dengan Nomor urut Loadstep)



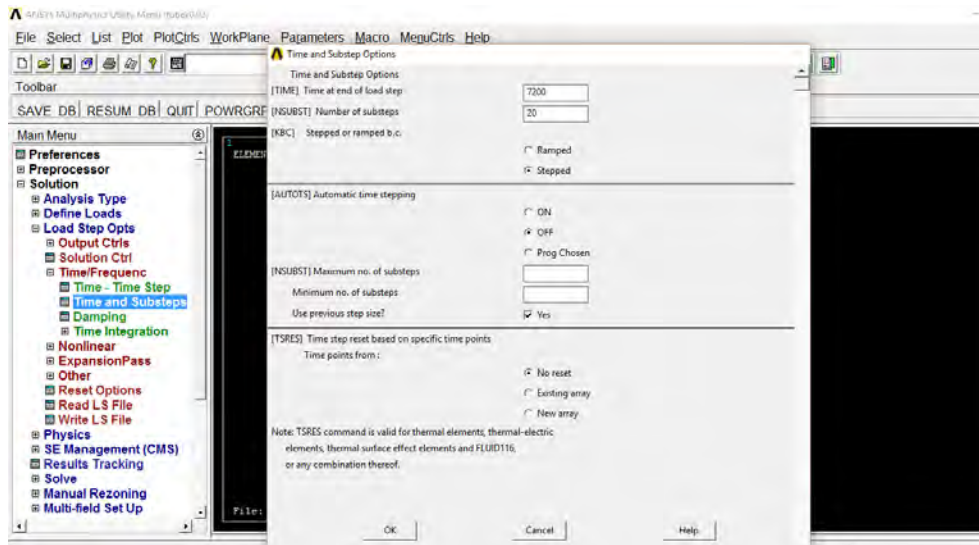
Melakukan kembali langkah 6 sampai 10 kemudian bisa ditulis ulang formulasi kedalam notepad seperti berikut :



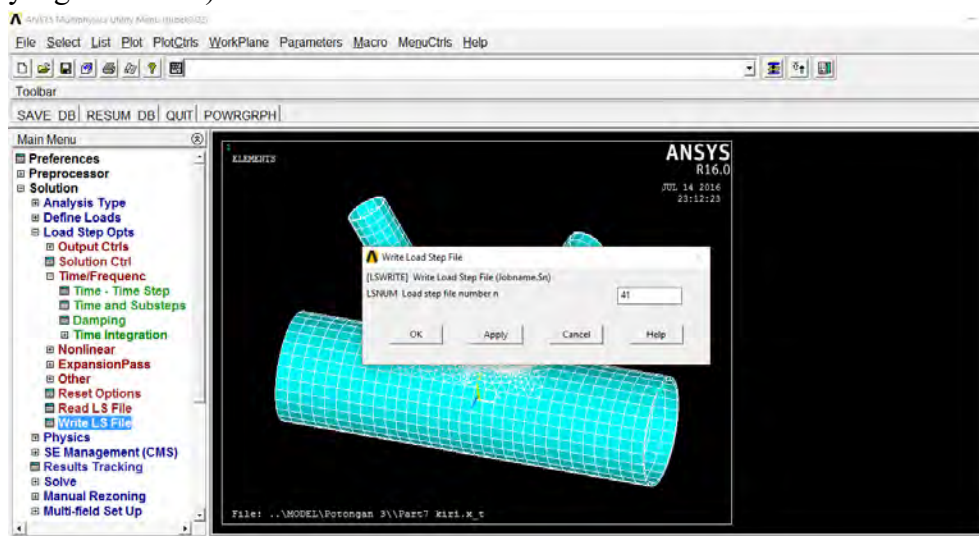
```
!!! LOADSTEP 1
LDREAD,TEMP,1,LAST, , , 'tubek','rth',' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,41.2
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,1,

!!! LOADSTEP 2
LDREAD,TEMP,2,LAST, , , 'tubek','rth',' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,82.4
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,1
KBC,1
!*
```

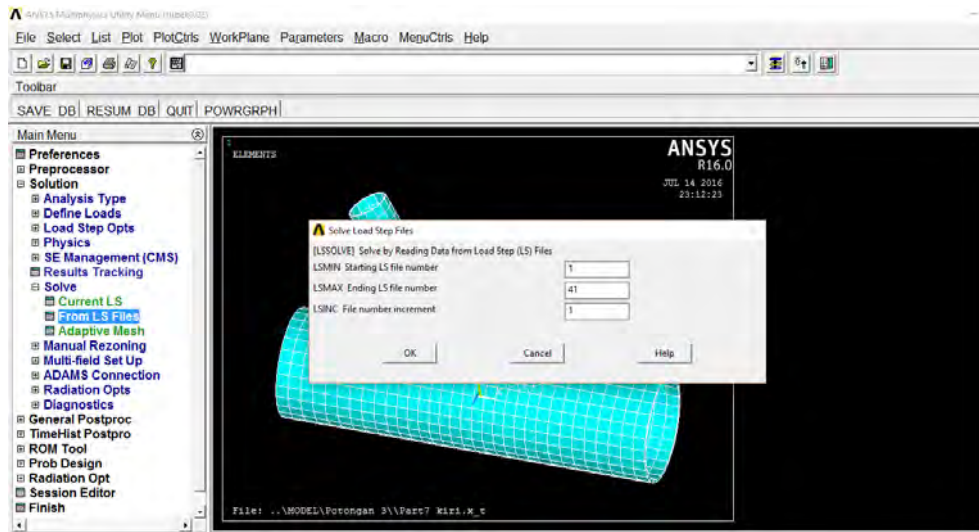
Selanjutnya lakukan Proses pendinginan pilih Main menu ➔ Pilih Solution
➔ Loadstep Opts ➔ Time/Frequenc ➔ pilih Time and Substeps
Isi kolom “TIME” dengan jumlah waktu yang dibutuhkan untuk
mendinginkan proses pengelasan secara keseluruhan dengan waktu tertentu
(beberapa jam)
Isi kolom “NSUBST (Number of substep)”
Check “Stepped”
Check “AUTOTS” pada kondisi “OFF”
Pastikan “TSRES” dalam kondisi “No reset”
OK



Kemudian kembali ke → Loadstep Opts → pilih Write LS File → isi kolom “LSWRITE” dengan jumlah Loadstep yang akan didinginkan (sebaiknya melebihi jumlah Loadstep yang akan didinginkan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik) → OK



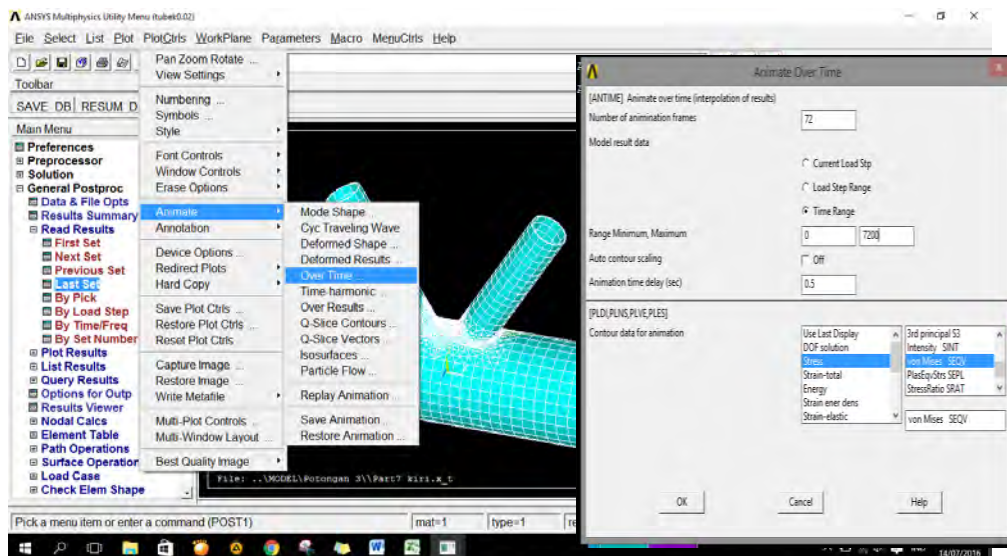
Main menu → Solution → Solve → pilih From LS File
 Isi kolom “LSSOLVE” pada LSMIN masukkan nomor awal Loadstep
 LSMAX masukkan nomor akhir Loadstep
 LSINC default increment 1
 Klik OK



Tunggu sampai hasil runningnya selesai

Untuk melihat hasil running pilih Main menu → General Postproc → Data & File Opts → Browse “file rst” → OK

Kemudian untuk melihat simulasi stress pada spesimen pilih Main menu → General Postproc → Read Result → pilih Last Set



LAMPIRAN C

Script Pembebanan Termal

LAMPIRAN C

Skript Pembebanan Termal

| | | |
|---|---|---|
| <pre> !!!! LOADSTEP 1 !!!! INPUT CONVECT FLST,2,87,5,ORDE,14 FITEM,2,1 FITEM,2,-2 FITEM,2,7 FITEM,2,-38 FITEM,2,42 FITEM,2,51 FITEM,2,-71 FITEM,2,76 FITEM,2,-77 FITEM,2,79 FITEM,2,-82 FITEM,2,86 FITEM,2,95 FITEM,2,-118 /GO !* SFA,P51X,1,CONV,15,3 00 FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,20 /GO !* !!!! INPUT HF SFA,P51X,1,HFLUX,122 15932,63 !* NEQIT,3000 !* !* TIME,20.8 AUTOTS,0 NSUBST,20, , ,1 KBC,1 !* TSRES,ERASE LSWRITE,1, !!!! DELETE HF FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,20 SFADELE,P51X,1,HFLUX !!!! DELETE CONVECT FLST,2,87,5,ORDE,14 FITEM,2,1 FITEM,2,-2 FITEM,2,7 FITEM,2,-38 FITEM,2,42 FITEM,2,51 FITEM,2,-71 FITEM,2,76 FITEM,2,-77 FITEM,2,79 FITEM,2,-82 FITEM,2,86 FITEM,2,95 FITEM,2,-118 SFADELE,P51X,1,CONV </pre> | <pre> FITEM,2,1 FITEM,2,-2 FITEM,2,7 FITEM,2,-38 FITEM,2,42 FITEM,2,51 FITEM,2,-71 FITEM,2,76 FITEM,2,-77 FITEM,2,79 FITEM,2,-82 FITEM,2,86 FITEM,2,95 FITEM,2,-118 SFADELE,P51X,1,CONV !!!! LOADSTEP 2 !!!! INPUT CONVECT FLST,2,87,5,ORDE,14 FITEM,2,1 FITEM,2,-2 FITEM,2,7 FITEM,2,-38 FITEM,2,42 FITEM,2,51 FITEM,2,-71 FITEM,2,76 FITEM,2,-77 FITEM,2,79 FITEM,2,-82 FITEM,2,86 FITEM,2,95 FITEM,2,-118 /GO !* SFA,P51X,1,CONV,15,3 00 FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,19 /GO !* !!!! INPUT HF SFA,P51X,1,HFLUX,122 15932,63 !* NEQIT,3000 !* </pre> | <pre> !* TIME,41.6 AUTOTS,0 NSUBST,20, , ,1 KBC,1 !* TSRES,ERASE LSWRITE,2, !!!! DELETE HF FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,20 SFADELE,P51X,1,HFLUX !!!! DELETE CONVECT FLST,2,87,5,ORDE,14 FITEM,2,1 FITEM,2,-2 FITEM,2,7 FITEM,2,-38 FITEM,2,42 FITEM,2,51 FITEM,2,-71 FITEM,2,76 FITEM,2,-77 FITEM,2,79 FITEM,2,-82 FITEM,2,86 FITEM,2,95 FITEM,2,-118 SFADELE,P51X,1,CONV !!!! LOADSTEP 3 !!!! INPUT CONVECT FLST,2,87,5,ORDE,14 FITEM,2,1 FITEM,2,-2 FITEM,2,7 FITEM,2,-38 FITEM,2,42 FITEM,2,51 FITEM,2,-71 FITEM,2,76 FITEM,2,-77 FITEM,2,79 FITEM,2,-82 FITEM,2,86 FITEM,2,95 FITEM,2,-118 SFADELE,P51X,1,CONV </pre> |
|---|---|---|


```

FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,18
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,62.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,3,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 4
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7

```

```

FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,17
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,83.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,4,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86

```

```

FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 5
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,16
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,104
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,5,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2

```



```

FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 6
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,15
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,124.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,6,

```

```

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 7
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,14
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*

```

```

NEQIT,3000
!*
!*
TIME,145.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,7,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 8
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*

```

SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,13
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*

NEQIT,3000
!*

!*

TIME,166.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*

TSRES,ERASE
LSWRITE,8,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 9
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51

FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*

SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,12
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*

NEQIT,3000
!*

!*

TIME,187.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*

TSRES,ERASE
LSWRITE,9,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 10
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*

SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,11
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*

NEQIT,3000
!*

!*

TIME,208
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*

TSRES,ERASE
LSWRITE,10,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42

FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 11
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118

/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,10
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,228.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,11,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 12
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118

/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,9
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1

TIME,249.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,12,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 13
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,32

```

/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,270.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,13,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 14
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79

```

```

FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,27
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,291.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,14,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 15
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14

```

```

FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,26
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,312
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,15,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77

```

```

FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 16
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,25
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,332.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,16,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT

```

```

FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 17
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,24
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,353.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1

```

```

!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,17,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 18
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,23
/GO
!*

!!!! INPUT HF

```

SFA,P51X,1,HFLUX,122
 15932,63
 !*
 NEQIT,3000
 !*
 !*
 TIME,374.4
 AUTOTS,0
 NSUBST,20, , ,1
 KBC,1
 !*
 TSRES,ERASE
 LSWRITE,18,

 !!!! DELETE HF
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,20
 SFADELE,P51X,1,HFLUX

 !!!! DELETE CONVECT
 FLST,2,87,5,ORDE,14
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-2
 FITEM,2,7
 FITEM,2,-38
 FITEM,2,42
 FITEM,2,51
 FITEM,2,-71
 FITEM,2,76
 FITEM,2,-77
 FITEM,2,79
 FITEM,2,-82
 FITEM,2,86
 FITEM,2,95
 FITEM,2,-118
 SFADELE,P51X,1,CONV

 !!!! LOADSTEP 19
 !!!! INPUT CONVECT
 FLST,2,87,5,ORDE,14
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-2
 FITEM,2,7
 FITEM,2,-38
 FITEM,2,42
 FITEM,2,51
 FITEM,2,-71
 FITEM,2,76
 FITEM,2,-77
 FITEM,2,79
 FITEM,2,-82
 FITEM,2,86
 FITEM,2,95
 FITEM,2,-118

/GO
 !*
 SFA,P51X,1,CONV,15,3
 00
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,22
 /GO
 !*

 !!!! INPUT HF
 SFA,P51X,1,HFLUX,122
 15932,63
 !*
 NEQIT,3000
 !*
 !*
 TIME,395.2
 AUTOTS,0
 NSUBST,20, , ,1
 KBC,1
 !*
 TSRES,ERASE
 LSWRITE,19,

 !!!! DELETE HF
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,20
 SFADELE,P51X,1,HFLUX

 !!!! DELETE CONVECT
 FLST,2,87,5,ORDE,14
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-2
 FITEM,2,7
 FITEM,2,-38
 FITEM,2,42
 FITEM,2,51
 FITEM,2,-71
 FITEM,2,76
 FITEM,2,-77
 FITEM,2,79
 FITEM,2,-82
 FITEM,2,86
 FITEM,2,95
 FITEM,2,-118
 SFADELE,P51X,1,CONV

 !!!! LOADSTEP 20
 !!!! INPUT CONVECT
 FLST,2,87,5,ORDE,14
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-2
 FITEM,2,7
 FITEM,2,-38

FITEM,2,42
 FITEM,2,51
 FITEM,2,-71
 FITEM,2,76
 FITEM,2,-77
 FITEM,2,79
 FITEM,2,-82
 FITEM,2,86
 FITEM,2,95
 FITEM,2,-118
 /GO
 !*
 SFA,P51X,1,CONV,15,3
 00
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,21
 /GO
 !*

 !!!! INPUT HF
 SFA,P51X,1,HFLUX,122
 15932,63
 !*
 NEQIT,3000
 !*
 !*
 TIME,416
 AUTOTS,0
 NSUBST,20, , ,1
 KBC,1
 !*
 TSRES,ERASE
 LSWRITE,20,

 !!!! DELETE HF
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,20
 SFADELE,P51X,1,HFLUX

 !!!! DELETE CONVECT
 FLST,2,87,5,ORDE,14
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-2
 FITEM,2,7
 FITEM,2,-38
 FITEM,2,42
 FITEM,2,51
 FITEM,2,-71
 FITEM,2,76
 FITEM,2,-77
 FITEM,2,79
 FITEM,2,-82
 FITEM,2,86
 FITEM,2,95

```

FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 21
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,63
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,436.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,21,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7

```

```

FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 22
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,62
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,457.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,22,

```

```

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 23
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,61
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000

```

```

!*
!*
TIME,478.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,23,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 24
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00

```

```

FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,60
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,499.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,24,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 25
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76

```

```

FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,59
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,520
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,25,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 26

```



```

!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,58
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,540.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,26,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71

```

```

FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 27
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,57
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,561.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,27,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

```

```

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 28
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,56
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,582.4
AUTOTS,0

```

```

NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,28,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 29
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,55
/GO
!*

```

```

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,603.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,29,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 30
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86

```

```

FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,54
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,624
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,30,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 31
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2

```

```

FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,53
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,644.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,31,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82

```

```

FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 32
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,76
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,665.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,32,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1

```

```

FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 33
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,71
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,686.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE

```

```

LSWRITE,33,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 34
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,70
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63

```

```

!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,707.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,34,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 35
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*

```

```

SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,69
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,728
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,35,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 36
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51

```

```

FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,68
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,748.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,36,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

```

```

!!!! LOADSTEP 37
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,67
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,769.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,37,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42

```

```

FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!! LOADSTEP 38
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,3
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,66
/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,790.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,38,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1

```

```
!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*

```

```

!!!! LOADSTEP 40
!!!! INPUT CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,
00
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,64

```

```

/GO
!*

!!!! INPUT HF
SFA,P51X,1,HFLUX,122
15932,63
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,832
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,40,

!!!! DELETE HF
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
SFADELE,P51X,1,HFLUX

!!!! DELETE CONVECT
FLST,2,87,5,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-38
FITEM,2,42
FITEM,2,51
FITEM,2,-71
FITEM,2,76
FITEM,2,-77
FITEM,2,79
FITEM,2,-82
FITEM,2,86
FITEM,2,95
FITEM,2,-118
SFADELE,P51X,1,CONV

```

LAMPIRAN D
***Script* Pembebanan Struktural**

LAMPIRAN D

Skript Pembebanan Struktural

```
!!!! LOADSTEP 1
LDREAD,TEMP,1,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,20.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,1,

!!!! LOADSTEP 2
LDREAD,TEMP,2,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,41.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,2,

!!!! LOADSTEP 3
LDREAD,TEMP,3,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,62.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,3,

!!!! LOADSTEP 4
LDREAD,TEMP,4,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,83.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,4,

!!!! LOADSTEP 5
LDREAD,TEMP,5,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,104
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,5,

!!!! LOADSTEP 6
LDREAD,TEMP,6,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,124.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,6,

!!!! LOADSTEP 7
LDREAD,TEMP,7,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
```



```

!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,145.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,7,

!!!! LOADSTEP 8
LDREAD,TEMP,8,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,166.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,8,

!!!! LOADSTEP 9
LDREAD,TEMP,9,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,187.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE

```

```

LSWRITE,9,

!!!! LOADSTEP 10
LDREAD,TEMP,10,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,208
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,10,

!!!! LOADSTEP 11
LDREAD,TEMP,11,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,228.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,11,

!!!! LOADSTEP 12
LDREAD,TEMP,12,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

```

```

!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,249.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,12,

!!!! LOADSTEP 13
LDREAD,TEMP,13,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,270.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,13,

!!!! LOADSTEP 14
LDREAD,TEMP,14,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,291.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1

```

```

!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,14,

!!!! LOADSTEP 15
LDREAD,TEMP,15,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,312
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,15,

!!!! LOADSTEP 16
LDREAD,TEMP,16,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,332.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,16,

!!!! LOADSTEP 17
LDREAD,TEMP,17,LAST,
,

```

```

,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,353.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,17,

!!!! LOADSTEP 18
LDREAD,TEMP,18,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,374.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,18,

!!!! LOADSTEP 19
LDREAD,TEMP,19,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*

```

```

!*
TIME,395.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,19,

!!!! LOADSTEP 20
LDREAD,TEMP,20,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,416
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,20,

!!!! LOADSTEP 21
LDREAD,TEMP,21,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,436.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,21,

!!!! LOADSTEP 22

```

```

LDREAD,TEMP,22,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,457.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,22,

!!!! LOADSTEP 23
LDREAD,TEMP,23,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,478.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,23,

!!!! LOADSTEP 24
LDREAD,TEMP,24,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*

```

```

NEQIT,3000
!*
!*
TIME,499.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,24,

!!!! LOADSTEP 25
LDREAD,TEMP,25,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,520
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,25,

!!!! LOADSTEP 26
LDREAD,TEMP,26,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,540.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,26,

```

```

!!!! LOADSTEP 27
LDREAD,TEMP,27,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,561.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,27,

!!!! LOADSTEP 28
LDREAD,TEMP,28,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,582.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,28,

!!!! LOADSTEP 29
LDREAD,TEMP,29,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*

```

```

OUTRES,ALL, LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,603.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,29,

!!!! LOADSTEP 30
LDREAD,TEMP,30, LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL, LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,624
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,30,

!!!! LOADSTEP 31
LDREAD,TEMP,31, LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL, LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,644.8
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1

```

```

!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,31,

!!!! LOADSTEP 32
LDREAD,TEMP,32, LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL, LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,665.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,32,

!!!! LOADSTEP 33
LDREAD,TEMP,33, LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL, LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,686.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,33,

!!!! LOADSTEP 34
LDREAD,TEMP,34, LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'

```

```

!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL, LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,707.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,34,

!!!! LOADSTEP 35
LDREAD,TEMP,35, LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL, LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,728
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,35,

!!!! LOADSTEP 36
LDREAD,TEMP,36, LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL, LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,748.8

```

```

AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,36,

!!!! LOADSTEP 37
LDREAD,TEMP,37,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,769.6
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,37,

!!!! LOADSTEP 38
LDREAD,TEMP,38,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,790.4
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,38,

!!!! LOADSTEP 39
LDREAD,TEMP,39,LAST,
,

```

```

,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,811.2
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,39,

!!!! LOADSTEP 40
LDREAD,TEMP,40,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,832
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,40,

!!!! LOADSTEP 41
LDREAD,TEMP,41,LAST,
,
,'tubek0.02','rth','
'
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,LAST,
!*
NEQIT,3000
!*

```


```

!*
TIME,7200
AUTOTS,0
NSUBST,20, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,41,

```

LAMPIRAN E

Welding Procedure Specification 1112 WPS
G 15

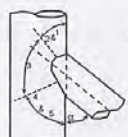
| | | |
|--|--|---|
|  PT. GUNANUSA UTAMA FABRICATORS | WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) 1112 / WPS / G / 15 STANDARD & CODE : AWS D1.1 2010 Edition CLIENT SPECIFICATION : 2009 F | DATE : 15 October, 2015 PROJECT : Daman Development Project CLIENT : ONGC SUPPORTING PQR No. : 1111 / WPQTR / G / 15 1111-1 / WPQTR / G / 15 1112-3 / WPQTR / G / 15 |
|--|--|---|

Welding Process (es) : SMAW - FCAW Type : MANUAL - SEMI AUTOMATIC

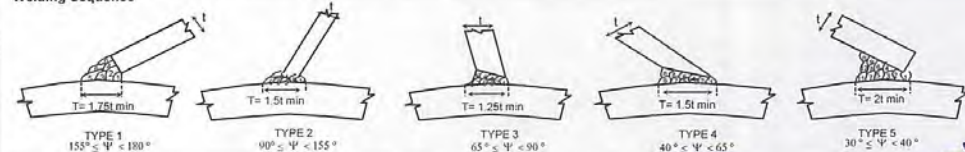
| | |
|--|---|
| JOINT DESIGN USED Type : SINGLE BEVEL Single side welding <input checked="" type="checkbox"/> Double side welding <input type="checkbox"/> Backing : Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Backing material : N/A Root Opening : 3 - 7 mm Root Face Dimension 0 - 2 mm Groove Angle : 15° up to 90° Back Gouging : Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> | POSITION Position of Groove : TKY Vertical Progression : Up <input checked="" type="checkbox"/> Down <input type="checkbox"/> Fillet : N/A ELECTRICAL CHARACTERISTICS Current : AC <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input checked="" type="checkbox"/> Pulsed <input type="checkbox"/> Other : |
|--|---|

| | |
|--|--|
| BASE METALS Material Spec. : API 2H 50 and Equivalence Material Type : 22-22, 22-2D, 22-2C, 22-2B, 2D-2C, 2D-2B, 2D-1D 2D-1C, 2D-1B, 2D-1A AWS Group No. : Group II to Group II Manufacturing process : Normalized to Normalized Thickness : Groove : 16 up to Unlimited Diameter (Pipe) : >20" FILLER METAL SMAW : A 5.1 AWS Specification : A 5.20 AWS Classification : E 7016-1 Trade name : Nippon Steel SHIELDING Flux : N/A Gas : CO ₂ Composition : 99.8% Electrode-Flux (Class) : N/A Flow Rate : 20 - 25 L / Min Gas Cup Size : 20 mm PREHEAT Preheat Temp. Min. : 3 mm < Thk ≤ 38 mm : ambient Temp. 38 mm < Thk ≤ 65 mm : 65 °C Thk > 65 mm : 110 °C Interpass Temp. Min : same as preheat temp. Max. : 250 °C Method of Preheat : Flame Torch, Method of Measurement: Digital Thermometer/Temple Stick | Tungsten Electrode (GTAW) Size : N/A Type : N/A TECHNIQUE Stringer or Weave Bead : STRING & WEAWE (2.5 x Electrode Diameter) Multi pass or Single pass (per side) : MULTIPASS Number of Electrode : Single Longitudinal : Lateral : Angle : Wire Feed Speed (in / Min) : 215 - 230 in / min Contact Tube to Work Distance : 15 - 25 mm Interpass Cleaning : GRINDING AND / OR BRUSHING POSTWELD HEAT TREATMENT Temperature : N/A Time : N/A |
|--|--|

WELDING PROCEDURE

| Weld pass | Process | Filler Metal | | Current | | Travel Speed (mm/min) | Positions | Heat Input (KJ / mm) | Joint Detail |
|-----------|---------|--------------|-----------|-----------------|-------------------------|-----------------------|-----------|----------------------|---|
| | | Class | Diam (mm) | Type & Polarity | Amps or Wire Feed Speed | | | | |
| Root | SMAW | E 7016-1 | 3.2 | DCEN | 75 - 109 | 18 - 24 | TKY | 3.51 Max |  $\alpha = 30^\circ - 90^\circ$ |
| Hot | SMAW | E 7016-1 | 3.2 | DCEP | 95 - 136 | 19 - 25 | TKY | 1.57 Max | |
| Fill | FCAW | E 71T-9C-J | 1.2 | DCEP | 148 - 209 | 20 - 26 | TKY | 1.83 Max | |
| Cap | FCAW | E 71T-9C-J | 1.2 | DCEP | 148 - 209 | 20 - 26 | TKY | 1.52 Max | |
| | | | | | | | | | |

Welding Sequence



| | | | | |
|---|--|---|---|---|
| PT GUNANUSA UTAMA FABRICATORS SIGN :  NAME : Adik Supriatna DATE : October 15, 2015 | SWIBER SIGN :  NAME : Syafruddin DATE : Nov 05, 2015 | TP/VELOSI SIGN :  NAME : R. H. H. H. DATE : 5/11/2015 | ONGC SIGN :  NAME : S. H. H. H. DATE : 9.11.15 | ONGC SIGN :  NAME : R. H. H. H. DATE : 10/11/15 |
|---|--|---|---|---|

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan nilai tegangan sisa dapat berkurang setelah diberi perlakuan PWHT. Berdasarkan analisis dan pembahasan yang dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari analisis yang dilakukan diketahui bahwa distribusi panas pada hasil pengelasan adalah memiliki suhu maksimum mencapai 2500 K pada akhir pengelasan kemudian setelah proses pendinginan selama 2 jam temperatur pada model kembali pada temperatur ruang yaitu 300 K.
2. Hasil tegangan sisa maksimum sebelum perlakuan PWHT pada sambungan tubular tipe K adalah sebesar 297 Mpa dan terletak pada daerah gap dari tubular K. Sedangkan untuk distorsi yang terjadi sebesar 0,03 m atau 3 cm yang terletak diujung teratas brace sebelah kanan.
3. Setelah diberi perlakuan PWHT tegangan sisa terus turun seiring dengan kenaikan suhu. Pengurangan tegangan sisa sebesar 7 MPa hingga 21,39 Mpa dari tegangan sisa sebelum PWHT. Untuk distorsi tidak ada perubahan sebelum maupun sesudah PWHT.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut mengenai tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Dianjurkan untuk membuat variasi model geometris sambungan tubular tipe K terlebih untuk jarak gap antar brace sehingga beban panas dan tegangan sisa yang terbentuk tidak terlalu besar.
2. Dianjurkan membuat variasi temperatur *heating rate* dan waktu *holding time* untuk perlakuan PWHT.
3. Dianjurkan untuk penelitian lebih lanjut disertai dengan perhitungan SCF agar dapat diketahui umur kelelahan dari sambungan tubular tipe K ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anam, Muhammad Saiful. 2009. “Analisa Perilaku Tegangan Sisa Dan Sudut Distorsi Pada Sambungan Fillet Dengan Variasi Tebal Pelat Menggunakan Metode Elemen Hingga”. Jurnal : Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- ASME section II. 2001. “**Materials**”. New York : The American Society of Mechanical Engineers New York.
- ASME section IX. 2001. “**Qualification Standard For Welding And Brazing Procedures, Welders, Brazers, And Welding And Brazing Operators**”. New York : The American Society of Mechanical Engineers New York.
- Aritonang, Miduk. 2015. „**PWHT Work**”. *PWHT Cycle Method*. (online), (<https://midukaritonang.wordpress.com/2015/11>), diakses 13 April 2016.
- Avecedo, C., Drezet, J.M., Nussbaumer, A. 2012. “**Simulation of Welding Stresses for Fatigue Design of Welded Tubular Connections**”. 10th International Conference on Math. Modelling of Weld Phenomena. Seggau.
- Awamasu, I Komang Ardo. 2013. “Pengaruh PWHT dan Non PWHT Dengan Las GTAW Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Pada Pipa ASTM A-106 Grade B”. **Jurnal. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya**. Surabaya
- AWS D 1.1. 2004. *American Welding Society, Structural Welding Code Steel*. Miami Florida: Fourth Edition.
- Jang, G.C., Chang, K.H., Lee, C.H. 2007. “*Characteristic of The Residual Stress Distribution in Welded Tubular T-joints*”. **Journal of Mechanical Science and Technology**.

- J. LU, J. F. Flavenot and Lieurade, H. LIEURADE: Intégration de la notion des contraintes résiduelles dans les bureaux d'étude, 1991.
- Logan, Daryl L. 2007. ***“First Course in The Finite Element Method. Thomson”***. Canada.
- Marcus, M. K. Lee. 2004. ***“Finite Element Modelling”***. *Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering*. (online), (offshoremechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1455213), diakses 12 Januari 2016.
- Okumura T, Wiryosumarto H. 1996 ***“Teknologi Pengelasan Logam Welding Engineering”***. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Paradowka, A., Price, J.W.H., Ibrahim, R. 2006. ***“Measurement of Residual Stress Distribution in Tubular Joints Considering PWHT”***. Material Science Forum Volume 30
- Pilipenko, Artem, 2001. ***“Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multi-Electrode Submerged Arc Welding”***. Department of Machine Design and Material Technology. Norway.
- Putra, Yudhistira Perdana. 2005. “Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Fillet T-Joint dengan Metode Elemen Hingga”. **Jurnal: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya**. Surabaya.
- Rodrigues, Telmo Viana. 2010. ***“Modeling PWHT for Residual Stresses Relieving in Welded Steel Plates Using The Finite Element Method”***. VI National Congress Of Mechanical Engineering.
- Saeed, Moaveni, 2003. ***“Finite Elemen Analysys: Theory and Application with ANSYS.”*** New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Setyawati, Sri Yuni. 2012. “Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Butt Joint dan T-Joint dengan Variasi Tebal Plat.”

Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
Surabaya.

-.-. “**SOLID70 Element**”. *ANSYS Theory Reference*. (online),
(www.ansys.stuba.sk/html/elem-55/chapter4/ES4-65.htm), diakses 3
Mei 2016.

